

*UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR*

*Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos  
Área de Mecánica de Fluidos*



*Ingeniería Técnica Industrial, Mecánica*

*PROYECTO FIN DE CARRERA*

***DISEÑO DE UNA BOMBA PROGRAMABLE  
PARA SIMULACIÓN DE FLUJO CARDIACO***

*Autor: José Alberto Herreruela Martín*

*Directora: Carolina Marugán Cruz*

*JULIO 2006*



# ***AGRADECIMIENTOS***

Quería agradecerse a todos los que me han apoyado y ayudado a que este proyecto salga a la luz.

Primero quería agradecerlo a Carolina Marugán, directora del proyecto, por su implicación, así como por su aportación de ideas, que han hecho que el proyecto haya tomado forma.

También quería agradecerse a Alberto Aliseda, por su contribución a la idea inicial, así como su apoyo durante todo el proceso de desarrollo del proyecto.

A los técnico del Departamento de Fluidos por su involucración en el proyecto.

Por otra parte quería agradecer su apoyo a mi familia, amigos y compañeros. En especial a Víctor y a Cynthia.

# ***RESUMEN***

*El objetivo del presente proyecto consiste en el desarrollo de una bomba que simule el flujo cardiaco.*

*Para llevarlo a cabo se han realizado las siguientes actuaciones: el diseño global de la bomba (los componentes principales que contiene la instalación), el diseño detallado de cada pieza, la fabricación o adquisición de cada componente, el montaje y ajuste del conjunto y la programación para la puesta en marcha del mismo.*

*Los ciclos arteriales se generan mediante la presión que ejerce un émbolo sobre el fluido, desplazándolo por una sección de ensayo. El movimiento del émbolo lo provoca un motor eléctrico, que transmite a éste el movimiento mediante un tornillo sin fin. El motor está programado para que reproduzca el caudal a través de una arteria.*

*Esta instalación servirá para realizar futuros estudios del comportamiento del flujo sanguíneo en el sistema arterial y venoso. En concreto los estudios que se van a realizar se van a centrar en el análisis de una arteria con aneurisma, que es la dilatación de una arteria, producida generalmente en una zona débil de la pared.*

# ÍNDICE

|   | <i>Págs.</i> |
|---|--------------|
| <b>1. Introducción.....</b>                             | <b>1</b>     |
| 1.1 Sangre y sistema circulatorio.....                  | 1            |
| 1.2 Corazón y ciclo cardiaco.....                       | 2            |
| 1.3 Aneurisma.....                                      | 5            |
| <b>2. Descripción del proyecto .....</b>                | <b>8</b>     |
| <b>3 Descripción de los componentes .....</b>           | <b>11</b>    |
| 3.1 Estudio previo de los componentes hidráulicos ..... | 11           |
| 3.2 Cálculo de pérdidas de carga.....                   | 13           |
| 3.3 Descripción detallada de los componentes .....      | 22           |
| 3.3.1 Cilindro.....                                     | 22           |
| 3.3.2 Tapas del cilindro.....                           | 22           |
| 3.3.3 Émbolo.....                                       | 23           |
| 3.3.4 Tornillo sin fin .....                            | 26           |
| 3.3.5 Motor paso a paso .....                           | 30           |
| 3.3.6 Junta de acoplamiento.....                        | 33           |
| 3.3.7 Activador del motor paso a paso .....             | 34           |
| 3.3.8 Controlador del motor paso a paso.....            | 36           |
| 3.3.9 Fuente de alimentación .....                      | 37           |
| 3.3.10 Soporte.....                                     | 39           |
| 3.3.11 Detector de fin de carrera .....                 | 44           |
| 3.3.12 Conexiones rápidas .....                         | 46           |
| 3.3.13 Conductos .....                                  | 49           |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.3.14 Depósito.....  | 50        |
| 3.3.15 Electroválvula.....  | 50        |
| <b>4. Conexiones .....</b>  | <b>52</b> |
| 4.1 Motor paso a paso .....   | 52        |
| 4.2 Activador del motor paso a paso.....  | 53        |
| 4.3 Controlador del motor paso a paso.....  | 56        |
| 4.4 Detectores de fin de carrera.....   | 62        |
| 4.5 Electroválvula.....   | 62        |
| 4.6 Fuente de alimentación .....  | 63        |
| <b>5. Estudio teórico del perfil de velocidades en la sección de ensayos.....</b> | <b>64</b> |
| <b>6. Programación .....</b>  | <b>70</b> |
| <b>7. Conclusiones.....</b>   | <b>73</b> |
| 7.1 Funcionamiento del equipo .....   | 73        |
| 7.2 Trabajos futuros .....  | 75        |
| <b>8. Presupuestos .....</b>  | <b>77</b> |
| 8.1 Componentes electrónicos y eléctricos.....                                    | 77        |
| 8.2 Componentes mecánicos .....   | 78        |
| 8.3 Componentes mecanizados.....  | 79        |
| 8.4 Presupuesto total del proyecto .....  | 87        |
| <b>9. Bibliografía .....</b>  | <b>88</b> |

## **Anexos**

*Anexo Planos*

*Anexo Fotográfico*

*Anexo Software*

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Sangre y sistema circulatorio

La sangre es una mezcla compleja de células, proteínas, lipoproteínas, e iones. La función principal de la sangre es proveer nutrientes (oxígeno, glucosa), elementos constituyentes del tejido y transportar desperdicios (como dióxido de carbono y ácido láctico). También permite que células y distintas sustancias (aminoácidos, lípidos, hormonas) sean transportadas entre tejidos y órganos. La sangre es alrededor del 7% del peso del cuerpo humano, aproximadamente cinco litros en un adulto.

La sangre está compuesta básicamente por plasma sanguíneo y células (glóbulos rojos, glóbulos blancos y plaquetas). Un 55% es plasma sanguíneo, que conforma el medio líquido de la sangre compuesto por agua y sales.

Los glóbulos rojos abarcan aproximadamente el 40% de la sangre. Son partículas semisólidas, que aumentan la viscosidad de la sangre y afectan al comportamiento del líquido. La sangre es aproximadamente dos veces y media más viscosa que el agua (entorno a  $2,7 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ ). Por otra parte, no exhibe una viscosidad constante en todos los índices de corriente y es especialmente **no newtoniana** en el sistema microcirculatorio. También exhibe un comportamiento no newtoniano en pequeños vasos y tubos capilares. **Sin embargo, en la mayoría de las arterias, la sangre se comporta de manera newtoniana, y la viscosidad se puede tomar como constante.**

La sangre circula alrededor de los pulmones y del cuerpo a través de los vasos sanguíneos, gracias a la acción de bombeo del corazón. Los vasos sanguíneos que componen el sistema cardiovascular son:

- **Arterias:** Las arterias están hechas de tres capas de tejido, uno muscular en el medio y una capa interna de tejido epitelial.

- **Capilares:** Los capilares están impregnados en los tejidos, permitiendo además el intercambio de gases dentro del tejido. Los capilares son muy delgados y frágiles.

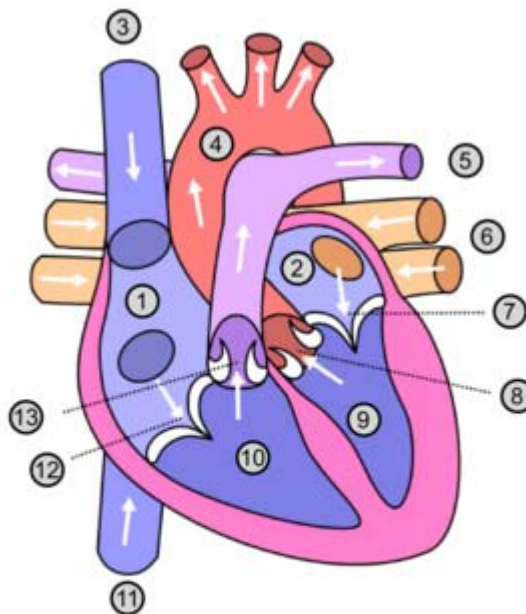
- **Venas:** Las venas transportan sangre a más baja presión que las arterias. La sangre es entregada a las venas por los capilares después que el intercambio entre el oxígeno y el dióxido de carbono ha tenido lugar.

Con la excepción de la arteria pulmonar y la arteria umbilical, y sus venas correspondientes, las arterias transportan la sangre oxigenada desde el corazón y la entregan al cuerpo a través de los tubos capilares, donde el oxígeno es consumido; luego las venas transportan la sangre desoxigenada de regreso al corazón.

## 1.2. Corazón y ciclo cardiaco

El flujo y la presión de la sangre son inestables. La naturaleza cíclica del bombeo del corazón crea condiciones pulsátiles en todas las arterias. El corazón es el órgano principal del aparato circulatorio. Es un músculo hueco que actúa como una bomba aspirante e impelente, aspira hacia las aurículas la sangre que circula por las venas, y la impulsa desde los ventrículos hacia las arterias.

El corazón se divide en dos mitades laterales, la parte derecha, en la que circula la sangre venosa y la parte izquierda, en la que circula la sangre arterial. Cada una de estas dos mitades se subdivide en otras dos, situadas una encima de la otra que son: la cavidad superior llamada aurícula o atrio, y la cavidad inferior llamada ventrículo. Cada aurícula comunica con el ventrículo por medio de un orificio llamado orificio auriculoventricular, que contiene una válvula derecha llamada válvula tricúspide y una válvula izquierda llamada válvula mitral. Las dos mitades del corazón están separadas en toda su altura, por medio de un tabique vertical que se llama tabique interauricular entre las dos aurículas y tabique interventricular entre los dos ventrículos.



Partes del corazón: 1. Atrio derecho, 2. Atrio izquierdo, 3. Vena cava superior, 4. Aorta, 5. Arteria pulmonar, 6. Vena pulmonar, 7. Válvula mitral, 8. Válvula aórtica, 9. Ventrículo izquierdo, 10. Ventrículo derecho, 11. Vena cava inferior, 12. Válvula tricúspide, 13. Válvula pulmonar

**Figura 1.1: Partes del corazón**

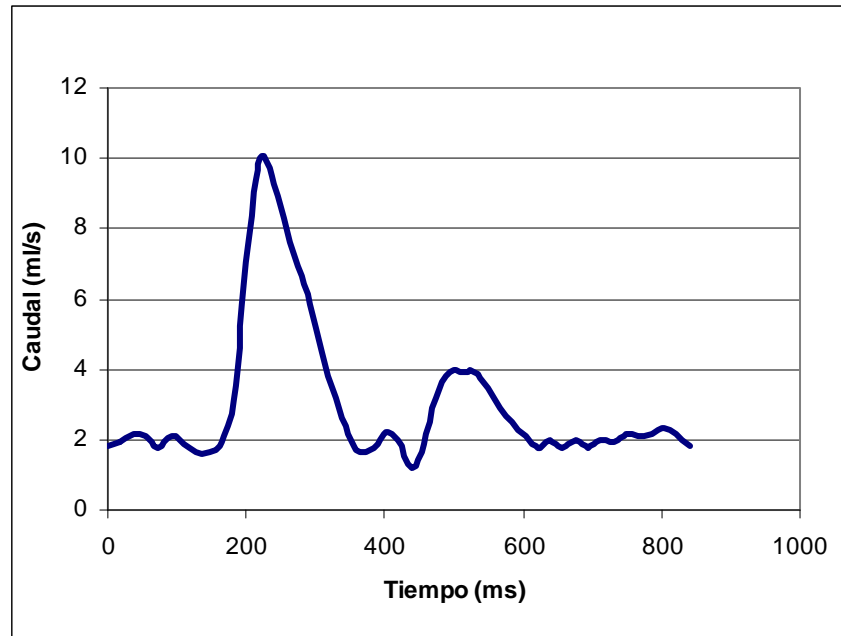
Cada latido del corazón desencadena una secuencia de eventos llamados ciclo cardiaco, que consiste principalmente en tres etapas: sístole auricular, sístole ventricular y diástole. Durante la sístole auricular, las aurículas se contraen y proyectan la sangre hacia los ventrículos. Una vez que la sangre ha sido expulsada de las aurículas, las válvulas auriculoventriculares entre las aurículas y los ventrículos se cierran. Esto evita el reflujo de sangre hacia las aurículas.



La sístole ventricular implica la contracción de los ventrículos expulsando la sangre hacia el sistema circulatorio. Una vez que la sangre es expulsada, las dos válvulas sigmoideas, la válvula pulmonar en la derecha y la válvula aórtica en la izquierda, se cierran.

Por último la diástole es la relajación de todas las partes del corazón para permitir la llegada de nueva sangre.

La forma que tiene el ciclo arterial es:



**Figura 1.2:** Flujo sanguíneo en la arteria carótida

Observándose que el punto máximo de caudal se obtiene al producirse la sístole ventricular. También se aprecia el punto de caudal mínimo al producirse la diástole.

La presión y el flujo de sangre que bombea el corazón tienen formas pulsátiles, características que varían en diversas partes del sistema arterial. La aorta, la arteria por la cual sale la sangre del corazón, proporciona un depósito de alta presión durante la diástole y la sístole. Así la presión arterial en la mayoría de las arterias es pulsátil, sin llegar a cero durante la diástole. En cambio, el flujo es cero o invertido, durante la diástole en algunas arterias tales como la carótida externa, braquial, y arterias femorales. En otras arterias tales como las arterias carótidas o renales internas, el flujo puede ser alto durante la diástole. El flujo en estas arterias es más uniforme.

En el flujo sanguíneo el número de Reynolds varía de valores próximos a 1 en arterias pequeñas, a valores de 4000 en las más grandes. Así el flujo atraviesa unos vasos sanguíneos en los cuales las fuerzas viscosas son dominantes en un extremo, mientras que en otros las fuerzas de inercia son más importantes.

En la mayoría de las arterias las fuerzas viscosas no pueden ser despreciadas. Para una arteria de tamaño mediano, el número de Reynolds está comprendido entre 100



y 1000. Las fuerzas de inercia dominan a las fuerzas viscosas, para los flujos en el corazón y los grandes recipientes. El número de Reynolds en la sístole máxima es aproximadamente de 4000. El flujo en la aorta y el tronco pulmonar es similar a un flujo típico de entrada que no se desarrolla. Por lo tanto, la base del flujo se puede considerar una región no viscosa que sea rodeada por una capa de límite que se desarrolla en la pared. **Normalmente, el número de Reynolds en una arteria intracraneal no excede de 600 a 700 y el flujo es usualmente laminar.**

## 1.3. Aneurisma

El presente proyecto produce la simulación de pulsos arteriales, con el fin de poder realizar distintos estudios de enfermedades sobre éstas. Estos ensayos se van a centrar en arterias con aneurismas.

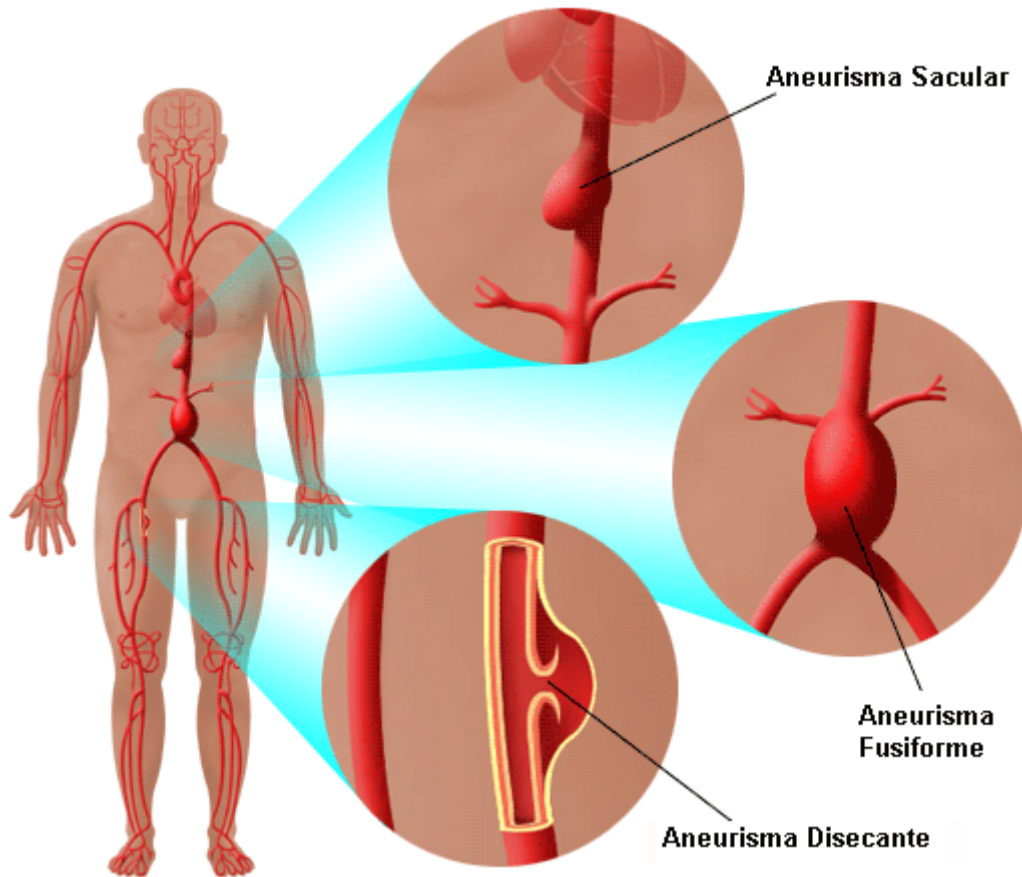
Un aneurisma es una dilatación localizada de una arteria, ocasionada por una degeneración de la pared. Su localización más habitual suele ser en la base del cerebro (el círculo de Willis) y en la aorta.

Macroscópicamente se distinguen tres formas básicas: el aneurisma sacular, el fusiforme y el disecante.

- **Aneurisma sacular:** en el aneurisma sacular está comprometido solo una parte del perímetro de la arteria. Consiste en un abultamiento en un punto concreto con un tallo estrecho. Como variantes se distinguen el aneurisma navicular y el infundibular. Los aneurismas saculares son generalmente los aneurismas aórticos sifilíticos y los cerebrales por displasia arterial.

- **Aneurisma fusiforme:** en el aneurisma fusiforme está comprometido todo el perímetro de la arteria. Consiste en un aumento del diámetro de una arteria. Algunas variantes de esta son el aneurisma cilíndrico y el anular. El aneurisma aterosclerótico suele ser fusiforme.

- **Aneurisma disecante:** en este aneurisma hay una disección de la pared a lo largo de la arteria, de manera que el vaso presenta dos paredes, una externa y una interna, y dos lúmenes, uno falso, el espacio de disección entre ambas paredes, y el lumen verdadero. En la aorta, donde el aneurisma disecante es más frecuente, casi siempre existe una fisura transversal de la capa interna, a través de la cual se comunican los dos lúmenes. Así, el lumen falso suele contener sangre, lo que constituye un hematoma disecante. Bajo la presión de esta sangre el tubo externo se haya dilatado y el interno a veces está colapsado.



**Figura 1.3:** Tipos de formas de aneurismas

Los aneurismas pueden ocurrir en cualquier lugar donde se localice una arteria, siendo estas sus ubicaciones más comunes:

- Aneurisma aórtico, se localiza a través de la arteria aorta, pudiendo ser aneurisma aórtico abdominal y aneurisma aórtico torácico. Se desconoce la causa exacta, pero los riesgos para desarrollar un aneurisma aórtico abarcan hipertensión, consumo de tabaco, colesterol alto y obesidad.
- Aneurisma cerebral, los aneurismas en el cerebro ocurren cuando hay un área debilitada en la pared de un vaso sanguíneo.
- Aneurisma en la arteria poplítea, la arteria que irriga la pierna.
- Aneurisma en la arteria mesentérica, la arteria que irriga el intestino.
- Aneurisma en la arteria esplénica, la arteria que irriga el bazo.

Los aneurismas en general pueden ser congénitos o adquiridos y no se tiene una claridad exacta sobre sus causas. Los defectos en algunos de los componentes de la pared arterial pueden ser responsables de esta condición.



Los trastornos congénitos que pueden provocar el desarrollo de un aneurisma son el síndrome de Marfán, y la sífilis. La aterosclerosis (acumulación de colesterol en las arterias) y la hipertensión (presión sanguínea alta) pueden contribuir a la formación de ciertos tipos de aneurismas. El embarazo está frecuentemente asociado con la formación o ruptura de aneurismas.

Los síntomas para detectar un aneurisma varían dependiendo de su localización. Frecuentemente se observa hinchazón con una masa pulsátil en el sitio del aneurisma, cuando el problema se presenta cerca de la superficie corporal. Los aneurismas dentro del cuerpo y el cerebro a menudo son asintomáticos y se detectan cuando ya se han roto.

El riesgo para la salud del individuo, resulta principalmente de la potencial ruptura del aneurisma, la trombosis, la infección o la atrofia en órganos vecinos. La ruptura causa una masiva hemorragia interna. La trombosis se produce al desprenderse del aneurisma coágulos sanguíneos, generados al producirse una recirculación dentro del aneurisma durante un tiempo extendido de tiempo, provocando la obstrucción de la arteria aguas abajo. La infección del aneurisma puede provocar la infección en otras partes del cuerpo e incluso la ruptura. El aneurisma puede provocar la compresión de otros órganos con la posibilidad de atrofiarlos.

Las arterias enfermas pueden crear altos niveles de turbulencia, pérdidas de presión, y condiciones de flujo estrangulado en la cual los vasos pueden colapsarse. El estudio del flujo de la sangre en arterias es un campo muy rico que abarca flujos inestables, variantes geométricas, y turbulencias.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

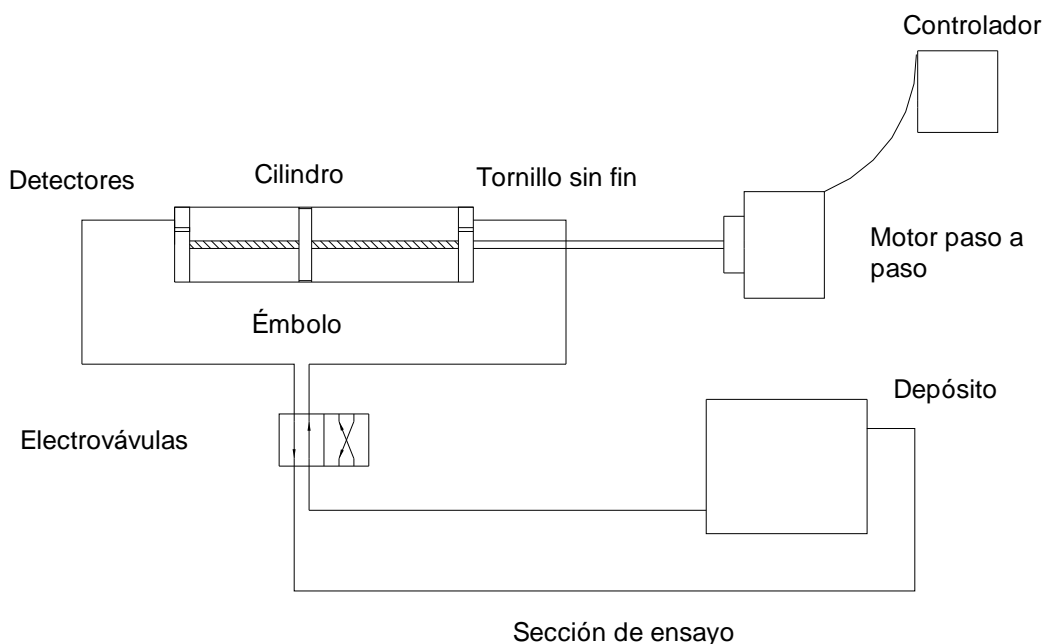
El proyecto consiste en el desarrollo de un sistema que simula los pulsos que se producen en una arteria. Este sistema contiene un motor paso a paso, manejado por un activador y un controlador; estando éste último programado previamente mediante código ASCII, desarrollado en un editor de texto y enviado al controlador, a través de un emulador terminal, una serie de ciclos a seguir por el motor.

El motor está ensamblado, mediante una junta de acoplamiento, a un tornillo sin fin que gira solidariamente con el motor, desplazando linealmente un émbolo que empuja al fluido que hay en el interior del cilindro. El émbolo empuja al fluido, desplazándolo por los conductos, donde se da el pulso deseado.

El cilindro está cerrado por unas tapas que contienen sendas entradas, donde el fluido entra o sale en función del sentido en que gira el motor. También, en las tapas del cilindro se encuentran unas purgas y detectores de fin de carrera.

Los conductos que salen del cilindro van a parar a una electroválvula. Ésta tiene cuatro vías, y su función es mantener constante el sentido de circulación de los otros dos conductos que interfieren en ella, cambiando su posición dependiendo del sentido del motor.

El recorrido de estas dos vías de la válvula, parte de una sección de ensayos, donde se simularán los distintos tipos de arterias con ciertas dolencias, dando a parar a un depósito abierto, y de éste sale otro conducto que se dirige de nuevo a la electroválvula.



**Figura 2.1:** Esquema global de la instalación



Esta instalación en funcionamiento, con la simulación del flujo arterial, servirá para realizar diferentes estudios en el comportamiento de una arteria. Los estudios que se van a realizar serán principalmente los análisis de una arteria con aneurisma. Para ello se simulará un pulso de la arteria que se quiere estudiar.

Para el presente proyecto se ha tomado el pulso de la arteria carótida, desarrollando para esta el diseño de los demás componentes y la programación. El pulso de ésta no difiere demasiado de las demás arterias, haciendo que el funcionamiento de la instalación con esta arteria permita el funcionamiento con las demás arterias.

El flujo de la arteria carótida es:

| Tiempo | Índice de flujo | Tiempo (ms) | Índice de flujo (ml/s) | Volumen (ml) | Re (r=4mm) | Re (r=2,2mm) |
|--------|-----------------|-------------|------------------------|--------------|------------|--------------|
| 0      | 0,18            | 0           | 1,8                    |              | 146,537    | 133,215      |
| 1      | 0,196           | 18,2609     | 1,96                   | 0,03433      | 159,562    | 145,056      |
| 2      | 0,215           | 36,5217     | 2,15                   | 0,03753      | 175,03     | 159,118      |
| 3      | 0,213           | 54,7826     | 2,13                   | 0,03908      | 173,402    | 157,638      |
| 4      | 0,179           | 73,0435     | 1,79                   | 0,03579      | 145,722    | 132,475      |
| 5      | 0,212           | 91,3043     | 2,12                   | 0,0357       | 172,587    | 156,898      |
| 6      | 0,188           | 109,565     | 1,88                   | 0,03652      | 153,049    | 139,136      |
| 7      | 0,164           | 127,826     | 1,64                   | 0,03214      | 133,511    | 121,374      |
| 8      | 0,163           | 146,087     | 1,63                   | 0,02986      | 132,697    | 120,634      |
| 9      | 0,196           | 164,348     | 1,96                   | 0,03278      | 159,562    | 145,056      |
| 10     | 0,31            | 182,609     | 3,1                    | 0,0462       | 252,368    | 229,426      |
| 11     | 0,753           | 200,87      | 7,53                   | 0,09706      | 613,011    | 557,283      |
| 12     | 1               | 219,13      | 10                     | 0,16006      | 814,092    | 740,083      |
| 13     | 0,952           | 237,391     | 9,52                   | 0,17823      | 775,015    | 704,559      |
| 14     | 0,83            | 255,652     | 8,3                    | 0,1627       | 675,696    | 614,269      |
| 15     | 0,696           | 273,913     | 6,96                   | 0,13933      | 566,608    | 515,098      |
| 16     | 0,588           | 292,174     | 5,88                   | 0,11723      | 478,686    | 435,169      |
| 17     | 0,45            | 310,435     | 4,5                    | 0,09477      | 366,341    | 333,038      |
| 18     | 0,321           | 328,696     | 3,21                   | 0,0704       | 261,323    | 237,567      |
| 19     | 0,215           | 346,957     | 2,15                   | 0,04894      | 175,03     | 159,118      |
| 20     | 0,165           | 365,217     | 1,65                   | 0,0347       | 134,325    | 122,114      |
| 21     | 0,179           | 383,478     | 1,79                   | 0,03141      | 145,722    | 132,475      |
| 22     | 0,221           | 401,739     | 2,21                   | 0,03652      | 179,914    | 163,558      |
| 23     | 0,2             | 420         | 2                      | 0,03844      | 162,818    | 148,017      |
| 24     | 0,117           | 438,261     | 1,17                   | 0,02894      | 95,2487    | 86,5898      |
| 25     | 0,19            | 456,522     | 1,9                    | 0,02803      | 154,677    | 140,616      |
| 26     | 0,319           | 474,783     | 3,19                   | 0,04647      | 259,695    | 236,087      |
| 27     | 0,391           | 493,043     | 3,91                   | 0,06483      | 318,31     | 289,373      |
| 28     | 0,395           | 511,304     | 3,95                   | 0,07177      | 321,566    | 292,333      |
| 29     | 0,393           | 529,565     | 3,93                   | 0,07195      | 319,938    | 290,853      |
| 30     | 0,347           | 547,826     | 3,47                   | 0,06757      | 282,49     | 256,809      |



|    |       |         |      |         |         |         |
|----|-------|---------|------|---------|---------|---------|
| 31 | 0,289 | 566,087 | 2,89 | 0,05807 | 235,273 | 213,884 |
| 32 | 0,248 | 584,348 | 2,48 | 0,04903 | 201,895 | 183,541 |
| 33 | 0,211 | 602,609 | 2,11 | 0,04191 | 171,773 | 156,158 |
| 34 | 0,179 | 620,87  | 1,79 | 0,03561 | 145,722 | 132,475 |
| 35 | 0,197 | 639,13  | 1,97 | 0,03433 | 160,376 | 145,796 |
| 36 | 0,178 | 657,391 | 1,78 | 0,03424 | 144,908 | 131,735 |
| 37 | 0,199 | 675,652 | 1,99 | 0,03442 | 162,004 | 147,277 |
| 38 | 0,178 | 693,913 | 1,78 | 0,03442 | 144,908 | 131,735 |
| 39 | 0,2   | 712,174 | 2    | 0,03451 | 162,818 | 148,017 |
| 40 | 0,196 | 730,435 | 1,96 | 0,03616 | 159,562 | 145,056 |
| 41 | 0,215 | 748,696 | 2,15 | 0,03753 | 175,03  | 159,118 |
| 42 | 0,212 | 766,957 | 2,12 | 0,03899 | 172,587 | 156,898 |
| 43 | 0,214 | 785,217 | 2,14 | 0,0389  | 174,216 | 158,378 |
| 44 | 0,232 | 803,478 | 2,32 | 0,04072 | 188,869 | 171,699 |
| 45 | 0,214 | 821,739 | 2,14 | 0,04072 | 174,216 | 158,378 |
| 46 | 0,18  | 840     | 1,8  | 0,03597 | 146,537 | 133,215 |

**Tabla 2.1:** Valores del pulso en la arteria carótida

Ver *Figura 1.2* para observar la gráfica que representa el pulso del caudal en función del tiempo.

El fluido que se utiliza en la instalación es agua, en sustitución de la sangre, siendo aceptable por la semejanza que existe en sus comportamientos en el régimen que se desea estudiar. La sangre, es un fluido no-newtoniano, teniendo sobre todo este comportamiento en capilares, cuyo diámetro es del orden del tamaño de los glóbulos rojos. Sin embargo, el comportamiento en vasos de más de 1 milímetro de diámetro, es perfectamente newtoniano.

La densidad de la sangre es prácticamente igual a la del agua, la viscosidad de la sangre a 37° es algo mayor que la del agua ( $2,7 \cdot 10^{-3}$  kg/m·s frente a  $1 \cdot 10^{-3}$  kg/m·s). Esto significa que, a igualdad de todas las demás variables, el número de Reynolds será unas 2 veces y media mayor con agua que con sangre. Esta variación no es excesivamente importante. Por otro lado es relativamente fácil de encontrar mezclas de líquidos con una viscosidad muy parecida a la de la sangre (40% etilenglicol y 60% agua). También se puede corregir el número de Reynolds modificando el diámetro de la sección a ensayar.

Por tanto, puede ser sustituida la sangre por agua para realizar los experimentos. Dicho agua será sembrada con partículas, capaces de seguir la velocidad del fluido, que servirán como trazadores, es decir, que servirán para medir el comportamiento del fluido dentro de las arterias (la velocidad, la vorticidad, los esfuerzos tangenciales en las paredes y demás factores interesantes).



### **3. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES**

#### **3.1. Estudio previo de los componentes hidráulicos**

En el diseño y la elección de los componentes se ha desarrollado un estudio previo para valorar la presión que va a llevar fluido a través de todo el recorrido.

Este estudio es el diseño primitivo de los componentes que influyen en las pérdidas de carga, para su posterior cálculo, el cual es necesario para la elección de determinados componentes.

Los componentes a estudiar son: cilindro, conductos, electroválvula y depósito.

##### **- Cilindro:**

El diseño previo del cilindro se basa en definir el diámetro interior, la longitud y el material del cual está compuesto.

El diámetro interior es de 92 mm, siendo necesario un equilibrio entre un tamaño mínimo y el máximo posible, para que la velocidad del émbolo, con los caudales usados, esté dentro del umbral de las velocidades deseadas.

La longitud es de 272 mm, siendo necesario recorrer una distancia mínima para poder realizar un determinado número de ciclos, pero que no sea muy grande para que no se produzcan grandes esfuerzos en su parte central, y para que sea más sencillo su mecanizado.

El material a usar es el metacrilato.

Estas medidas se van a utilizar para el cálculo de: la longitud para pérdidas primarias; el diámetro para el cálculo de la velocidad del fluido en ese tramo; y el material a utilizar para conocer la rugosidad, para el cálculo del coeficiente de fricción.

##### **- Conductos:**

El diseño previo ha consistido en la elección del diámetro, longitud de conductos y material de éstos.

Se ha elegido un diámetro de 9 mm. La longitud de las tuberías, que conectan los distintos dispositivos, es de aproximadamente 2 m. El material a utilizar es el poliuretano.



En los conductos se van a dar principalmente las pérdidas primarias

También hay que tener en cuenta el recorrido que tienen los conductos, para definir las pérdidas localizadas que se dan en los codos.

### **- Electroválvula:**

Lo importante en este estudio es fijarse en el tipo de válvula para determinar el coeficiente de pérdida de carga secundaria.

El tipo de válvula es corredera, teniendo una constante de pérdida de carga relativamente grande.

### **- Depósito:**

La importancia del depósito en este estudio es la diferencia de altura que hay entre la entrada y la salida. Esta diferencia es nula, es decir, están a la misma altura, con el fin de reducir las pérdidas de carga.

También las pérdidas de carga secundarias en el depósito se dan a la entrada del fluido en él.

### 3.2. Cálculo de pérdidas de carga

Las pérdidas de carga son las pérdidas de energía que se producen como efectos no ideales del desplazamiento de un fluido en una instalación. Las pérdidas de carga se dividen en:

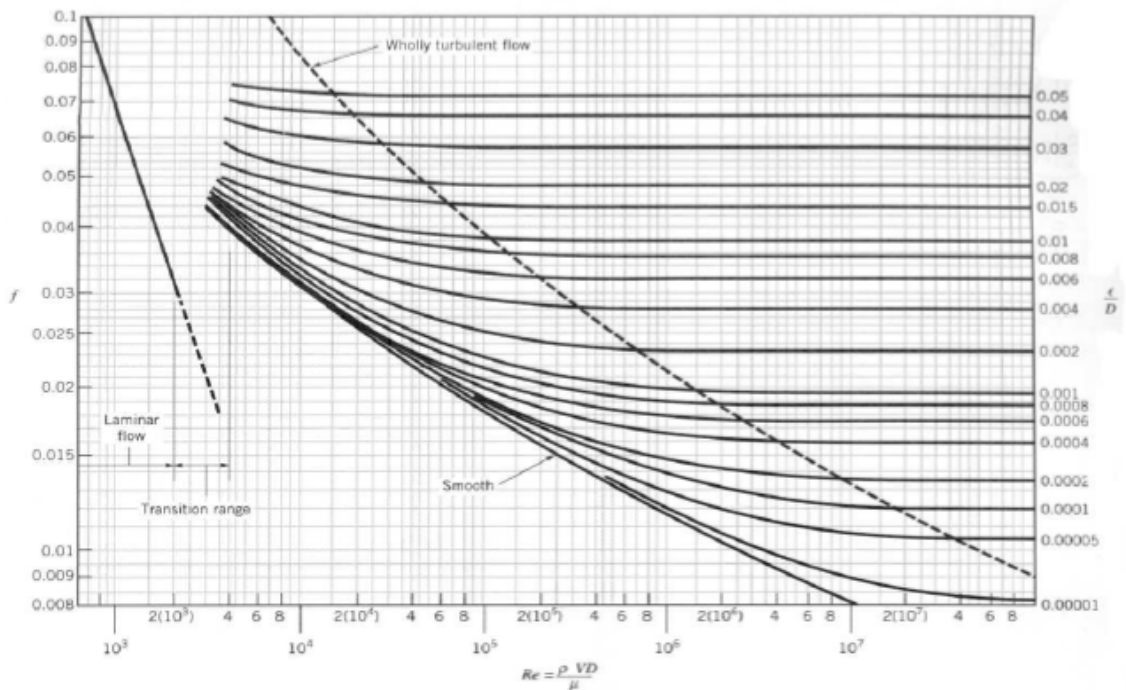
- Pérdidas de carga primarias. Generadas por la disipación viscosa, se producen tanto en régimen laminar como turbulento, son dominantes en tuberías de sección lentamente variable y radios de curvatura mayores que su sección característica. Se calculan mediante:

$$\Delta p_{\text{primarias}} = \frac{1}{2} \rho U_s^2 \frac{\lambda L}{D}$$

Siendo  $\lambda$  el coeficiente de fricción, que se obtiene del Ábaco de Moody. Para regímenes laminares sólo depende del número de Reynolds, siendo:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad \text{Re} < 2300$$

Para regímenes turbulentos ( $\text{Re} > 4000$ ) el coeficiente de fricción depende también del coeficiente de rugosidad del material y del diámetro.



**Figura 3.1:** Ábaco de Moody

- Pérdidas de carga secundarias. Generadas por la disipación viscosa por zonas desprendidas, se producen en zonas de cambio de geometría o sección en longitudes característica. Estas zonas son regiones del fluido de fuertes fluctuaciones y gradientes de velocidad locales, en los cuales la disipación viscosa es importante. Estas regiones típicas son válvulas, filtros, codos,... Se calculan mediante:

$$\Delta p_{\text{secundarias}} = \frac{1}{2} \rho U_s^2 K$$

Siendo  $K$  el coeficiente de pérdidas de carga secundarias, obteniéndose uno en cada región donde están localizadas.

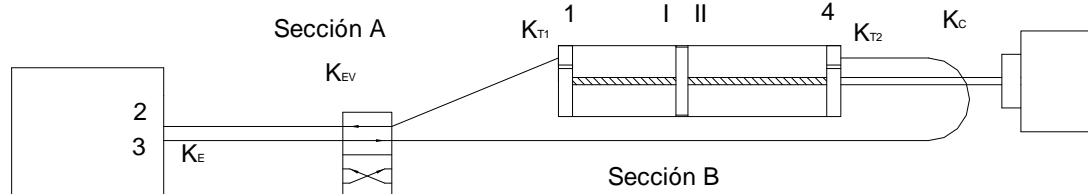
Para calcular las pérdidas de carga mediante el coeficiente de fricción y los coeficientes de pérdidas de carga secundarias se deben dar tres condiciones: que el flujo sea estacionario, el fluido sea incompresible y que las fuerzas másicas deriven de un potencial. Cumpliendo en la instalación que el fluido es incompresible al tener una densidad constante, cumpliendo también que las fuerzas másicas derivan de un potencial al derivar de la gravedad. Pero el flujo es pulsátil y no estacionario, por lo que no se podría calcular las pérdidas para cada instante.

Para el cálculo de pérdidas de carga, se ha estimado un flujo estacionario, con el caso más desfavorable, teniendo un flujo constante con el caudal máximo que se desarrolla.

El cálculo de pérdida de carga se realiza para saber la presión que tiene que vencer el émbolo para poder desplazarse. Las pérdidas de carga de la instalación se pueden expresar mediante:

$$\left( P_r + \frac{1}{2} \rho U_r^2 + \rho g z_r \right) = \left( P_s + \frac{1}{2} \rho U_s^2 + \rho g z_s \right) + \Delta p_{rs}$$

Comenzamos el cálculo desarrollando esta igualdad para un tramo de sección del conducto constante. Tomamos el tramo 1-2.



**Figura 3.2:** Esquema global con puntos característicos

$\Delta p_{12}$ : pérdidas de carga en el tramo 1-2



$$\Delta p_{12} = \frac{1}{2} \rho U_A^2 \left( \frac{\lambda_A L_A}{D_A} + K_{EV} + K_S \right)$$

$$\Delta P = \left( P_1 + \frac{1}{2} \rho U_1^2 + \rho g z_1 \right) - \left( P_2 + \frac{1}{2} \rho U_2^2 + \rho g z_2 \right)$$

En esta ecuación se puede simplificar debido a:

$$\frac{1}{2} \rho U_1^2 = \frac{1}{2} \rho U_2^2 \quad \text{La velocidad es la misma en las dos secciones} \quad U_1 = U_2 = U_A$$

$$\rho g z_1 = \rho g z_2 \quad \text{La altura en las dos secciones es prácticamente la misma}$$

La ecuación simplificada es:

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho U_A^2 \left( \frac{\lambda_A L_A}{D_A} + K_{EV} + K_P \right)$$

$P_1$ : presión en la sección 1

$P_2$ : presión en la sección 1

$\rho$ : densidad del fluido

$U_A$ : velocidad en el conducto A

$\lambda_A$ : coeficiente de fricción en el conducto A

$L_A$ : longitud del conducto A

$D_A$ : diámetro del conducto A

$K_{EV}$ : coeficiente de pérdida de carga en la electroválvula

$K_P$ : coeficiente de pérdida de carga en la entrada del depósito

La pérdida de carga en el tramo 3-4 es:

$$P_3 - P_4 = \frac{1}{2} \rho U_B^2 \left( \frac{\lambda_B L_B}{D_B} + K_{EV} + K_{T1} + K_E + K_C \right)$$

$P_3$ : presión en la sección 3

$P_4$ : presión en la sección 4

$U_B$ : velocidad en el conducto B



$\lambda_B$ : coeficiente de fricción en el conducto B

$L_B$ : longitud del conducto B

$D_B$ : diámetro del conducto B

$K_{EV}$ : coeficiente de pérdida de carga en la electroválvula

$K_{T1}$ : coeficiente de pérdida de carga en la contracción de la tapa

$K_E$ : coeficiente de pérdida de carga en la entrada del depósito

$K_C$ : coeficiente de pérdida de carga en el codo 180°

Haciendo las mismas simplificaciones que en el tramo 1-2. Calculamos por otra parte  $P_2$ , que es igual a la presión atmosférica más la suma de columna de agua que hay por encima del orificio:

$$P_2 = P_a + \rho \cdot g \cdot z_2$$

$P_a$ : presión atmosférica

$g$ : fuerza de la gravedad

$z_2$ : altura de columna de agua sobre el punto 2

Calculamos  $P_3$ , que es igual a la presión atmosférica más la suma de columna de agua que hay por encima del orificio:

$$P_3 = P_a + \rho \cdot g \cdot z_3$$

$z_3$ : altura de columna de agua sobre el punto 3

Igualando se obtiene que:

$$P_2 = P_3 + \rho \cdot g \cdot (z_2 - z_3)$$

$z_2 = z_3$  por lo que se simplifica el cálculo

$$P_2 = P_3$$

Teniendo en cuenta que las secciones A y B son del mismo diámetro y material, si se introduce en esta ecuación los valores de  $P_2$  y  $P_3$  obtenidos de las ecuaciones simplificadas de pérdida de carga en los dos tramos anteriores se obtiene:

$$P_1 - P_4 = \frac{1}{2} \rho U_T^2 \left( 1 + \frac{\lambda_T L_T}{D_T} + 2 \cdot K_{EV} + K_C + K_E + K_{T1} + K_P \right)$$



$L_T$ : longitud total

$$L_T = L_A + L_B = 2 \text{ m}$$

$\rho$ : densidad del agua, constante en toda sección

$$\rho = 998,2 \text{ kg/m}^3 \text{ (para } 20^\circ \text{ C)}$$

$D_T$ : diámetro de las tuberías

$$D_T = 0,009 \text{ m}$$

Para el cálculo de diferencia de presión, el caudal máximo que se da en el pulso de la arteria, se toma como constante, es decir, como estacionario, siendo  $165 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ .

$U_T$ : la velocidad en la tubería

$$U_T = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_T^2}$$

$Q$ : caudal constante estimado

$$Q = 10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$U_T = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_T^2} = \frac{4 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot 0,009^2} = 0,1572 \text{ m/s}$$

$\lambda_T$ : coeficiente de fricción, determinado en el Ábaco de Moody

$$\lambda_T = \left( \frac{\varepsilon}{D_T}, \text{Re}_T \right)$$

$\varepsilon_T$ : rugosidad del poliuretano

$$\varepsilon_T = 0,0015 \text{ mm}$$

$\text{Re}_T$ : Reynolds de las tuberías

$$\text{Re}_T = \frac{\rho \cdot U_T \cdot D_T}{\mu} = \frac{U_T \cdot D_T}{\nu}$$

$\mu$ : viscosidad del agua

$\nu$ : viscosidad cinemática del agua

$$\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \text{ (para } 20^\circ \text{ C)}$$



$$\text{Re}_T = \frac{U_T \cdot D_T}{\nu} = \frac{2,594 \cdot 0,009}{10^{-6}} = 1414$$

$$\frac{\varepsilon_T}{D_T} = 1,67 \cdot 10^{-4}$$

$$\lambda = \left( \frac{\varepsilon_T}{D_T}, \text{Re}_T \right) = 0,0452$$

$$K_{EV} = 13,7$$

$$K_C = 0,2$$

$$K_E = 0,4$$

$$K_{T1} = 1$$

$$K_P = 1$$

$$P_1 - P_4 = \frac{1}{2} \rho U_T^2 \left( 1 + \frac{\lambda_T L_T}{D_T} + 2 \cdot K_{EV} + K_C + K_E + K_{T1} + K_P \right)$$

$$P_1 - P_4 = \frac{1}{2} 998,2 \cdot 0,1572^2 (1 + 10,04 + 2 \cdot 13,7 + 0,2 + 1 + 0,4) = 493,933 \text{ Pa}$$

Esto sería la diferencia de presión que hay sobre las dos entradas del cilindro. Para obtener la presión a cada lado del émbolo, habría que sustituir cada expresión en el resultado anterior:

$$P_I - P_1 = \frac{1}{2} \rho U_c^2 \left( \frac{\lambda_c L_c}{D_c} + K_{T2} \right) \quad \text{y} \quad P_4 - P_{II} = \frac{1}{2} \rho U_D^2 \left( \frac{\lambda_D L_D}{D_D} \right)$$

$$P_1 - P_4 = (P_I - P_{II}) - \frac{1}{2} \rho U_D^2 \left( \frac{\lambda_D L_D}{D_D} \right) - \frac{1}{2} \rho U_c^2 \left( \frac{\lambda_c L_c}{D_c} + K_{T2} \right)$$

Siendo el mismo conducto (el cilindro), por lo que es el mismo material, diámetro,... Obteniendo que:

$$P_I - P_{II} = (P_1 - P_4) + \frac{1}{2} \rho U_{CIL}^2 \left( \frac{\lambda_{CIL} L_{CIL}}{D_{CIL}} + K_{T2} \right)$$

$$L_D + L_C = L_{CIL}$$

$L_{CIL}$ : longitud que recorre el émbolo





$$L_{CIL} = 0,272 - 0,0405 = 0,2315 \text{ m}$$

$K_{T2}$ : coeficiente de pérdida de carga en la expansión de la tapa

$$K_{T2} = 0,4$$

$$\lambda_{CIL} = \left( \frac{\varepsilon_{CIL}}{D_{CIL}}, \text{Re}_{CIL} \right)$$

$\varepsilon_{CIL}$ : rugosidad del metacrilato

$$\varepsilon_{CIL} = 0,0015 \text{ mm}$$

$$D_{CIL} = 0,092 \text{ m}$$

$$\text{Re}_{CIL} = \frac{U_{CIL} \cdot D_{CIL}}{\nu}$$

$$U_{CIL} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_{CIL}^2}$$

$$Q = 10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$U_{CIL} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_{CIL}^2} = \frac{4 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{\pi \cdot 0,092^2} = 1,504 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$\text{Re}_{CIL} = \frac{U_{CIL} \cdot D_{CIL}}{\nu} = \frac{1,504 \cdot 10^{-3} \cdot 0,092}{10^{-6}} = 138$$

$$\lambda = \left( \frac{\varepsilon}{D_{CIL}}, \text{Re}_{CIL} \right) = 0,4624$$

$$P_I - P_{II} = \frac{1}{2} \rho U_T^2 \left( 1 + \frac{\lambda_T L_T}{D_T} + 2 \cdot K_{EV} + K_C + K_E + K_{T1} \right) + \frac{1}{2} \rho U_{CIL}^2 \left( \frac{\lambda_{CIL} L_{CIL}}{D_{CIL}} + K_{T2} \right)$$

$$P_I - P_{II} = 493,933 + \frac{1}{2} \cdot 998,2 \cdot (1,504 \cdot 10^{-3})^2 (1,16 + 0,4) = 493,935 \text{ Pa}$$

Siendo la diferencia de presión que tiene que vencer el émbolo para poder moverse, para ese caudal.

$$W = Q \cdot \Delta P = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 493,935 = 4,939 \cdot 10^{-3} \text{ W}$$

W: potencia máxima necesaria

La potencia que desarrolle el motor debe ser superior a ésta.

En las ecuaciones se observa que da igual el sentido que recorra el fluido, que el cálculo y el resultado de la diferencia de presión es igual. Al ser simétricas las expansiones y contracciones de los distintos conductos, y al ser las pérdidas de carga en la electroválvula iguales, independientemente de las posiciones de las vías.

### **NOMENCLATURA DEL CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE CARGA:**

$P_1$ : presión en la sección 1

$P_2$ : presión en la sección 1

$\rho$ : densidad del fluido

$U_A$ : velocidad en el conducto A

$\lambda_A$ : coeficiente de fricción en el conducto A

$L_A$ : longitud del conducto A

$D_A$ : diámetro del conducto A

$K_{EV}$ : coeficiente de pérdida de carga en la electroválvula

$K_C$ : coeficiente de pérdida de carga en el codo 180°

$P_3$ : presión en la sección 3

$P_4$ : presión en la sección 4

$U_B$ : velocidad en el conducto B

$\lambda_B$ : coeficiente de fricción en el conducto B

$L_B$ : longitud del conducto B

$D_B$ : diámetro del conducto B

$K_{EV}$ : coeficiente de pérdida de carga en la electroválvula

$K_{T1}$ : coeficiente de pérdida de carga en la contracción de la tapa

$K_E$ : coeficiente de pérdida de carga en la entrada del deposito

$P_a$ : presión atmosférica



$g$ : fuerza de la gravedad

$z_2$ : altura de columna de agua sobre el punto 2

$z_3$ : altura de columna de agua sobre el punto 3

$L_T$ : longitud total

$\rho$ : densidad del agua, constante en toda sección

$D_T$ : diámetro de las tuberías

$U_T$ : la velocidad en la tubería

$Q$ : caudal

$\varepsilon_T$ : rugosidad del poliuretano

$Re_T$ : Reynolds de las tuberías

$\mu$ : viscosidad del agua

$\nu$ : viscosidad cinemática del agua

$L_{CIL}$ : longitud que recorre el émbolo

$K_{T2}$ : coeficiente de pérdida de carga en la expansión de la tapa

$\varepsilon_{CIL}$ : rugosidad del metacrilato

$W$ : potencia máxima necesaria

### ***3.3. Descripción detallada de los componentes***

#### ***3.3.1. Cilindro***

La selección del cilindro se ha basado principalmente en la selección del material utilizado y las dimensiones.

El material utilizado es metacrilato, un termoplástico con suficiente resistencia para no deformarse a las presiones a las que va a trabajar, siendo importante el mantener un diámetro constante y que aguante fácilmente las condiciones de trabajo. También es importante el hecho de ser transparente para el buen mantenimiento del circuito, al poder apreciarse la aparición de burbujas de aire y la acumulación de residuos sólidos, para una posterior purga.

El cilindro tiene las dimensiones y geometría que se adjuntan en los planos. Ver Anexo Plano 4.

Las dimensiones más importantes son el radio interior y la longitud del cilindro. El radio interior es de 46 mm, lo que implica que para producir un caudal de 10 ml/s, se obtendría una velocidad del émbolo superior a 0,3mm/s. La longitud del cilindro debe de ser suficiente para que el émbolo pueda recorrer varios ciclos en una misma carrera, siendo de 272 mm.

El espesor de las paredes del cilindro debe ser calculado para que resista la presión y los esfuerzos de fricción a los que va a estar sometido. También debe ser fácilmente mecanizable y soportar el proceso de fabricación sin fracturas ni rallados. El grosor es de 4 mm de pared.

#### ***3.3.2. Tapas del cilindro***

La función de las tapas del cilindro consiste en conseguir el sellado de éste y la sujeción del tornillo sin fin, conductos,...

El material seleccionado para la fabricación de las tapas es el PVC, al ser resistente, fácil de mecanizar y con una gran disponibilidad. El conjunto del cilindro descarga su peso, a través de las tapas, sobre las barras del soporte. Las tapas llevan también unos rebajes en la parte inferior para apoyarse en esa zona y descargar parte de su peso. El montaje se detalla en los planos adjuntados. Ver Anexo Plano 1.

Se ha usado un grosor de la pieza suficiente para aguantar los esfuerzos. Además, también se ha tenido en cuenta la necesidad de realizar un cierto número de taladros, así como las distancias entre agujeros y las distancias de los agujeros a los bordes, de manera que los esfuerzos de mecanizado sean fácilmente soportados por el material.



El conjunto del cilindro se une a través de unos ejes de sujeción, que realiza la función de alinear en el mismo eje todo el conjunto.

Las tapas llevan unos refuerzos de latón en las zonas donde van alojadas los cojinetes, el retén del eje (tornillo sin fin) y las conexiones rápidas. Todas las piezas de latón llevan incorporadas una juntas tóricas en la zona en contacto con las zonas de las tapas de PVC, para asegurar la estanqueidad del conjunto.

Las dimensiones del alojamiento de las juntas tóricas, sacadas de las tablas de Epidor, son:

-Para las juntas tóricas de 2 mm de diámetro su alojamiento tiene 2,86 mm de ancho y  $1,5 \pm 0,15$  mm de profundidad, con una calidad superficial de H7.

-Para las juntas tóricas de 3 mm de diámetro su alojamiento tiene 4,08 mm de ancho y  $2,3 \pm 0,15$  mm de profundidad, con una calidad superficial de H7.

Las tapas del cilindro tienen las dimensiones y geometría que se adjuntan en los planos. Ver Anexo Planos 2 y 3.

Las tapas presentan agujeros para las conexiones al exterior. Estos agujeros sirven para incorporar las varillas-guías, las purgas, el detector de posición por inducción, y los conductos de la instalación.

### 3.3.3. Émbolo

La función del émbolo es desplazar el fluido produciendo un flujo desde el cilindro hacia la sección de ensayos y de retorno desde esta hacia el cilindro.

La selección del émbolo está basada principalmente en la elección del material y sus dimensiones. El émbolo tiene que soportar la presión del empuje del fluido y la fricción con el cilindro.

Se elige de material nylon con refuerzos de latón en las superficies que están en contacto con el fluido y con el tornillo, para que no se produzca desgaste y con el consiguiente riesgo de holgura entre el émbolo y el eje de giro.

Está compuesto de tres piezas principales, una central de nylon, otra de latón que abarca uno de los laterales y la tuerca del émbolo, y otro de los laterales de latón. Están unidas mediante cuatro tornillos por cada lateral a la parte central.

También tiene dos juntas tóricas en la parte en contacto con el cilindro, para que no pase el fluido de un lado al otro del émbolo. Las dimensiones del alojamiento de las juntas tóricas de 3 mm, sacadas de las tablas de Epidor, son de 3,57 mm de ancho y  $2,64 \pm 0,06$  mm de profundidad.

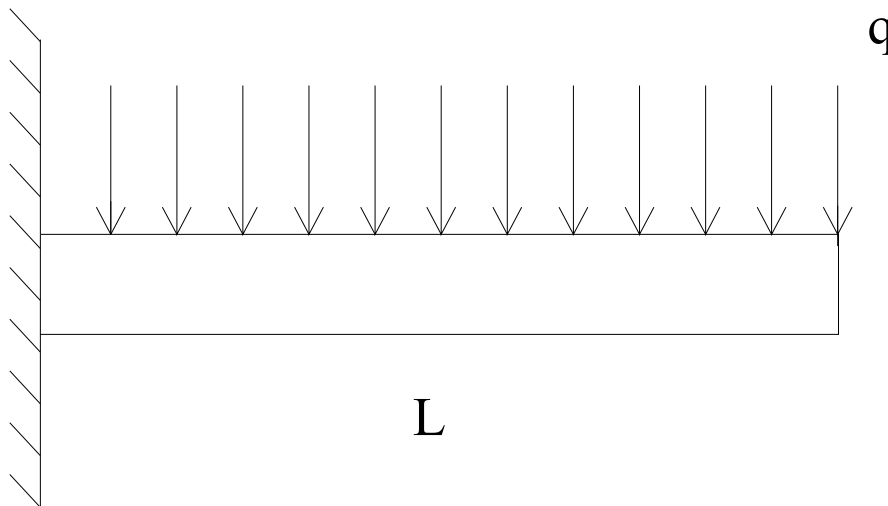
Se le ha incluido una pieza por cada lado de teflón, para corregir la holgura entre el tornillo y la tuerca, y no pase el fluido por la zona de la rosca.

También lleva dos piezas incorporadas, que sobresalen de la superficie del émbolo, para que detecte el sensor el fin de carrera antes, ya que la rosca del tornillo sin fin no llega a ocupar todo el posible recorrido del cilindro.

El émbolo tiene las dimensiones y geometría que se adjuntan en los planos. Ver Anexo Planos 5 y 6.

### ESFUERZOS SOBRE EL ÉMBOLO

Para el cálculo de la resistencia del émbolo, se simplifica su geometría a una viga empotrada por un extremo y libre en el otro. Siendo la parte empotrada la zona roscada, y la parte en voladizo, la zona en contacto con el cilindro.



**Figura 3.3:** Esfuerzos a los que está sometido el émbolo

-El esfuerzo sufrido por el émbolo en la pieza de latón, es:

$$\sigma_{el} = \frac{M_y \cdot z}{I_y}$$

$$M_y \text{ (Momento que se ejerce sobre la parte roscada del émbolo)} = q \cdot L \frac{L}{2}$$

L (longitud del radio del émbolo que está en contacto con el fluido) = R-r

R (radio mayor del émbolo, en la parte del latón) = 44 mm

r (radio menor del émbolo, en la parte del latón) = 7 mm



$$L = R - r = 44 - 7 = 37 \text{ mm}$$

$$q \text{ (carga que ejerce el fluido sobre el émbolo)} = \Delta P \cdot \frac{\pi(R^2 - r^2)}{R - r}$$

$$\Delta P \text{ (diferencia de presión máxima a vencer por el émbolo)} = 493,9 \text{ Pa}$$

$$q = \Delta P \cdot \frac{\pi(R^2 - r^2)}{R - r} = 493,9 \cdot \frac{\pi(0,044^2 - 0,007^2)}{0,044 - 0,007} = 79,13 \text{ N/m}$$

$$M_y = q \cdot \frac{L^2}{2} = 79,13 \cdot \frac{0,037^2}{2} = 0,054 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$z \text{ (la mitad de la altura del émbolo)} = h/2 = 41/2 = 20,5 \text{ mm}$$

$$I_y \text{ (momento de inercia del émbolo)} = \frac{1}{12} \cdot h^3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r$$

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot h^3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r = \frac{1}{12} \cdot 41^3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 7 = 25,261 \text{ cm}^4$$

Este momento de inercia es menor que el real, pero con esta simplificación se facilita el modelo de análisis y resulta un mayor coeficiente de seguridad.

$$\sigma_{e1} = \frac{M \cdot z}{I_y} = \frac{0,054 \cdot 0,0185}{25,261 \cdot 10^{-8}} = 3967 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{e1} = 3,967 \cdot 10^{-3} \text{ MPa} < \sigma_u = 147 \text{ MPa (límite elástico del latón)}$$

-El esfuerzo sufrido por el émbolo en la pieza del nylon, es:

$$\sigma_{e2} = \frac{M_y \cdot z}{I_y}$$

$$M_y = q \cdot L \cdot \frac{L}{2}$$

$$L = R - r$$

$$R \text{ (radio mayor del émbolo, en la parte del nylon)} = 46 \text{ mm}$$

$$r \text{ (radio menor del émbolo, en la parte del nylon)} = 15 \text{ mm}$$

$$L = R - r = 46 - 15 = 31 \text{ mm}$$



$$q = \Delta P \cdot \frac{\pi(R^2 - r^2)}{R - r} = 493,9 \cdot \frac{\pi(0,046^2 - 0,015^2)}{0,046 - 0,015} = 30,13 \text{ N/m}$$

$$M_y = q \cdot \frac{L^2}{2} = 30,13 \cdot \frac{0,031^2}{2} = 0,0145 \text{ N}\cdot\text{m}$$

z (la mitad de la altura del émbolo) =  $h/2 = 31/2 = 15,5 \text{ mm}$

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot h^3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r = \frac{1}{12} \cdot 31^3 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 15 = 23,398 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_{e2} = \frac{M \cdot z}{I_y} = \frac{0,0145 \cdot 0,0155}{23,398 \cdot 10^{-8}} = 959 \text{ Pa}$$

$$\sigma_{e2} = 0,959 \cdot 10^{-3} \text{ MPa} < \sigma_u = 132 \text{ MPa} \text{ (límite elástico del nylon)}$$

Comprobándose que el émbolo resiste este tipo de cargas para ambos materiales.

### 3.3.4. Tornillo sin fin

El tornillo sin fin tiene la función de mover linealmente el émbolo, transmitiendo el giro del motor.

En el diseño del tornillo sin fin se ha tenido en cuenta las cargas que tiene soportar y el ambiente, estando sumergido en agua. Se ha seleccionado acero inoxidable como el material más idóneo. También son importantes las dimensiones, para determinar la transmisión y su capacidad resistiva.

Este eje está dividido en tres segmentos: una parte que abarca la zona roscada, otra parte va desde el final de la zona roscada (todavía en el interior del cilindro) hasta fuera de la tapa, y una tercera pieza va desde este extremo a la junta de acoplamiento que se une al motor.

El eje tiene las dimensiones y geometría que se adjuntan en los planos. Ver Anexo Plano 4.

Se ha tomado de diámetro 14 mm de métrica para la rosca y un paso de 2 mm, de acuerdo con la norma para este tipo de tornillos y turcas.

#### TRANSMISIÓN DEL TORNILLO SIN FIN:

Para el cálculo de la transmisión de la velocidad se hace en función del caudal (Q) que se desarrolla por las instalaciones, con una media de  $30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ , y un máximo de  $165 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ . Para calcular la velocidad, se realiza mediante:





$$Q = U \cdot A = U \cdot \pi \cdot (R^2 - r^2)$$

R (radio interior del cilindro) = 46 mm

r (radio menor del émbolo) = 7 mm

- Para un caudal medio:

$$U_{\text{pistón}} \text{ (velocidad que se mueve el pistón)} = \frac{Q}{A} = \frac{1,8 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 / \text{s}}{6493,672 \text{ mm}^2} = 0,277 \text{ mm/s}$$

Se tiene que cumplir que la velocidad que tiene el pistón es la inversa del producto del paso del tornillo entre el tiempo que da una vuelta el tornillo:

$$U_{\text{pistón}} = p \cdot N$$

p (paso del tornillo) = 2 mm

N (revoluciones por segundo)

$$N = \frac{U_{\text{pistón}}}{p} = \frac{0,277 \text{ mm/s}}{2 \text{ mm}} = 0,139 \text{ rps} = 8,3 \text{ rpm}$$

Se obtiene que el motor debe girar a 8,31 rpm para desarrollar un caudal de  $1,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  en el cilindro.

- Para un caudal máximo:

$$U_{\text{pistón}} \text{ (velocidad que se mueve el pistón)} = \frac{Q}{A} = \frac{1 \cdot 10^4 \text{ mm}^3 / \text{s}}{6493,672 \text{ mm}^2} = 1,54 \text{ mm/s}$$

Se tiene que cumplir que la velocidad que tiene el pistón es la inversa del producto del paso del tornillo entre el tiempo que da una vuelta el tornillo:

$$U_{\text{pistón}} = p \cdot N$$

p (paso del tornillo) = 2 mm

N (revoluciones por segundo)

$$N = \frac{U_{\text{pistón}}}{p} = \frac{1,54 \text{ mm/s}}{2 \text{ mm}} = 0,77 \text{ rps} = 46,2 \text{ rpm}$$

Se obtiene que el motor debe girar a 46,2 rpm para desarrollar un caudal de  $10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  en el cilindro.

**CÁLCULO DEL PAR NECESARIO:**

Para este tornillo sin fin, el par que requiere el motor paso a paso para mover el émbolo a las velocidades deseadas, se calculará mediante:

$$T = \frac{P_m}{\omega}$$

T (par máximo necesario para mover el tornillo)

$\omega$  (velocidad máxima del tornillo sin fin) = 4,84 rad/s

$P_m$  (potencia necesaria para mover el tornillo) =  $\Delta P \cdot Q$

$\Delta P$  (diferencia de presión a superar por el émbolo) = 493,9 Pa

$Q$  (caudal máximo) =  $10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

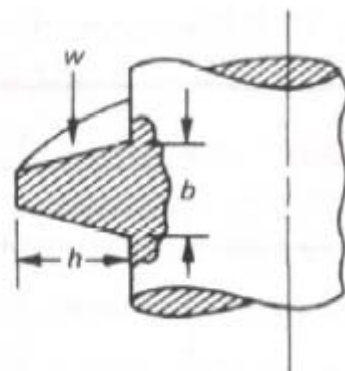
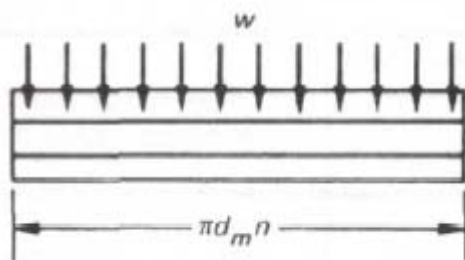
$$T = \frac{\Delta P \cdot Q}{\omega} = \frac{493,9 \cdot 10 \cdot 10^{-6}}{4,84} = 1,021 \text{ mN}\cdot\text{m}$$

En los cálculos realizados para el par que se debe ejercer para mover el tornillo no se ha tenido en cuenta la fuerza de rozamiento entre las guías y el émbolo, entre el cilindro y el émbolo, y entre el tornillo y la tuerca. Por lo que se ha tenido un coeficiente de seguridad muy grande.

**ESFUERZOS SOBRE EL TORNILLO SIN FIN:**

Los esfuerzos mayores que tiene que soportar el tornillo son sobre la rosca, esfuerzo flector y cortante, ya que los esfuerzos como presión por aplastamiento, esfuerzo por pandeo, esfuerzo de tracción o compresión (del cuerpo), no tienen prácticamente importancia en nuestro caso.

El esfuerzo a flexión se obtiene considerando como si se tuviera una viga con una carga en el extremo. La carga  $W$  se supone que está uniformemente repartida en el diámetro medio del tornillo (es decir, que la carga  $W$  actúa a la mitad de la altura  $h$  de la rosca).



**Figura 3.4:** Esfuerzos a los que está sometido el tornillo sin fin

La sección transversal de la rosca desarrollada en la raíz es un rectángulo con una profundidad  $b$  y ancho  $\pi \cdot d_m \cdot n$  que se considera como viga, siendo:

$b$  (profundidad de la rosca) = 2 mm

$d_m$  (el diámetro medio de la rosca) = 13 mm

$n$  (el número de hilos en contacto entre el tornillo y la tuerca) = 20,5 hilos

El cálculo del esfuerzo flector es:

$$\sigma_t = \frac{M_y \cdot z}{I_y}$$

$$M_y = W \cdot \frac{h}{2}$$

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot n \cdot b^3 \cdot \pi \cdot d_m$$

$$z = b/2$$

$$\sigma_t = \frac{3 \cdot W \cdot h}{\pi \cdot d_m \cdot n \cdot b^2}$$

$\sigma_t$  (esfuerzo flector)

$h$  (altura de la rosca) =  $0,613 \cdot p = 1,227$  mm

$W$  (carga) =  $\Delta P \cdot A$

$\Delta P$  (presión máxima que ejerce el fluido sobre el émbolo) = 493,9 Pa

$A$  (superficie del émbolo en contacto con el fluido) =  $\pi \cdot (R^2 - r^2) = \pi \cdot (46^2 - 7^2) = 64,937 \text{ cm}^2$

$$W = \Delta P \cdot A = 493,9 \cdot 64,937 \cdot 10^{-4} = 3,207 \text{ N}$$

$$\sigma_t = \frac{3 \cdot W \cdot h}{\pi \cdot d_m \cdot n \cdot b^2} = \frac{3 \cdot 3,207 \cdot 1,227 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 13 \cdot 10^{-3} \cdot 20,5 \cdot (2 \cdot 10^{-3})^2} = 3525 \text{ Pa}$$

$$\sigma_t = 3,525 \cdot 10^{-3} \text{ MPa} < \sigma_u = 255 \text{ MPa (límite elástico del acero)}$$

Los esfuerzos cortantes transversales en la rosca del tornillo y de la tuerca son:

$$\tau_{to} = \frac{3 \cdot W}{2 \cdot \pi \cdot d_m \cdot n \cdot b} \text{ (tornillo)}$$



$$\tau_{tu} = \frac{3 \cdot W}{2 \cdot \pi \cdot d_0 \cdot n \cdot b} \text{ (tuerca)}$$

do (diámetro mayor tornillo) = 14 mm

$$\tau_{to} = \frac{3 \cdot W}{2 \cdot \pi \cdot d_m \cdot n \cdot b} = \frac{3 \cdot 3,207}{2 \cdot \pi \cdot 13 \cdot 10^{-3} \cdot 20,5 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 2873 \text{ Pa}$$

$$\tau_{to} = 2,873 \cdot 10^{-3} \text{ MPa} < \sigma_u = 255 \text{ MPa} \text{ (límite elástico del acero)}$$

$$\tau_{tu} = \frac{3 \cdot W}{2 \cdot \pi \cdot d_0 \cdot n \cdot b} = \frac{3 \cdot 3,207}{2 \cdot \pi \cdot 14 \cdot 10^{-3} \cdot 20,5 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 2668 \text{ Pa}$$

$$\tau_{tu} = 2,668 \cdot 10^{-3} \text{ MPa} < \sigma_u = 255 \text{ MPa} \text{ (límite elástico del acero)}$$

### 3.3.5. Motor paso a paso

La función del motor es la de girar el tornillo sin fin para mover el émbolo.

Se necesita una gran precisión en los movimientos, de ahí que se tenga que seleccionar cuidadosamente entre los distintos motores eléctricos: motor de corriente continua, motor de corriente alterna, servomotor, motor paso a paso.

De estos el que nos interesa es el motor paso a paso, ya que el motor de corriente alterna y el de continua no son capaces de controlar ni su posición ni el par a emplear, y en cuando al servomotor sólo se controla el par de giro.

Un motor paso a paso se diferencia de un motor convencional en que en este se puede posicionar su eje en posiciones fijas o pasos, pudiendo mantener la posición, independientemente del par que debe ejercer el motor para conseguirlo. Esta peculiaridad es debida a la construcción del motor en si, teniendo por un lado el rotor constituido por un imán permanente y por el otro el estator construido por bobinas. Al alimentar estas bobinas se atraerá el polo magnético del rotor con respecto al polo generado por la bobina y este permanecerá en esta posición atraído por el campo magnético de la bobina hasta que esta deje de generar el campo magnético y se active otra bobina haciendo avanzar o retroceder el rotor variando los campos magnéticos en torno al eje del motor y haciendo que este gire.

Los motores paso a paso pueden ser de dos tipos:

- Bipolar: Este tipo de motor lleva dos bobinados independientes el uno del otro, para controlar este motor se necesita invertir la polaridad de cada una de las bobinas en la secuencia adecuada.

Cada inversión en la polaridad provoca el movimiento del eje, avanzando este un paso, la dirección de giro se corresponde con la dirección de la secuencia de pasos.

- Unipolar: Para controlar este tipo de motores existen tres métodos con sus correspondientes secuencias de encendido de bobinas, el común irá conectado al voltaje positivo o a masa según el circuito de control usado y luego tan solo se tiene que alimentar la bobina correcta para que avance o retroceda el motor según avance o retroceda en la secuencia.

Se ha escogido finalmente, el motor eléctrico paso a paso unipolar, debido a su precisión en su posicionamiento, su velocidad y su aceleración.

La selección del tipo de motor paso a paso se ha basado en el cumplimiento de ciertas condiciones. Una muy importante es el tener un par superior al par requerido para mover perfectamente el émbolo en todas las posibles velocidades que tome. El par necesario es superior a 1,021 mN·m, ya que hay que incorporar el rozamiento entre mecanismos, para el motor seleccionado.

También es de gran importancia el grado de precisión en el posicionamiento. Este grado de precisión se ve, dentro de los motores paso a paso, en el ángulo mínimo que es capaz de desarrollar.

Para nuestro caso, necesitamos usar una frecuencia de 3 Hz, ya que si tomamos una frecuencia máxima de latido cardiaco de 180 pulsaciones por minuto, se obtiene que cada 0,33 segundos se produce un ciclo. Cada ciclo necesita una precisión de unos 30 puntos significativos, para tener una correcta modelización de la gráfica que representa un ciclo. Realizando el siguiente cálculo podemos comprobar el valor del ángulo mínimo que necesitaríamos que desarrollara el motor:

s (puntos para definir un ciclo) = 30 divisiones

T (periodo del ciclo) = 0,33 s

$t_{\min}$  (tiempo mínimo necesario para definir una división) =  $\frac{T}{s} = 0,011$  s

$n_{\min}$  (revoluciones mínimas necesarias) =  $n \cdot t_{\min} = 4,62 \cdot 0,011 = 0,0826$  revoluciones

Para un caudal mínimo de 1ml/s se tiene una velocidad de 4,62 rpm

$n_{\min} = n \cdot t_{\min} = 4,62 \cdot 0,011 = 0,0508$  revoluciones

Siendo esto igual a un ángulo mínimo de 18,3°.

Pasos =  $360^\circ / 18,3^\circ = 19,7$  pasos

Es necesario un mínimo de 20 pasos por vuelta, desarrollando 18,3° por paso. Moviéndose el émbolo una distancia mínima de 0,1 mm (para un motor de 200 pasos por vuelta). Es de gran importancia para la selección del conjunto de componentes

electrónicos, la tensión y la intensidad de corriente que tienen. También para la selección de la fuente de alimentación.

El motor tiene que tener la misma o menor intensidad de corriente nominal que la de salida del controlador, porque sino se desarrolla la capacidad del motor sólo hasta donde llegue la intensidad del controlador.

Se ha seleccionado el motor SIZE 23 STEPPER 1200MNM6V de RS.

Éste, es un motor paso a paso híbrido tetrafásico que proporciona un par de trabajo y unas velocidades de paso mucho mayores que las que se obtienen con los tipos de imán permanente, pero manteniendo al mismo tiempo una resolución muy alta debido al pequeño ángulo de paso.

Este motor produce pasos de salida discretos cuando se carga y acciona correctamente. El número de pasos y la velocidad de rotación vienen determinados respectivamente por el número de impulsos y la frecuencia de la señal de entrada.

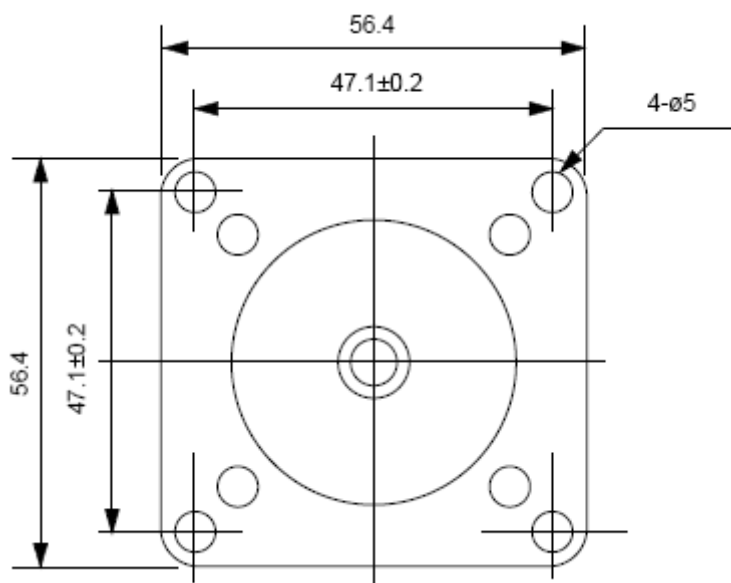
Desarrolla un par máximo de 1,2 Nm permitiendo mover el tornillo sin fin a las características deseadas. Tiene también 200 pasos por vuelta realizando una precisión mayor que la necesaria, desplazándose en émbolo una distancia mínima de 0,01 mm.

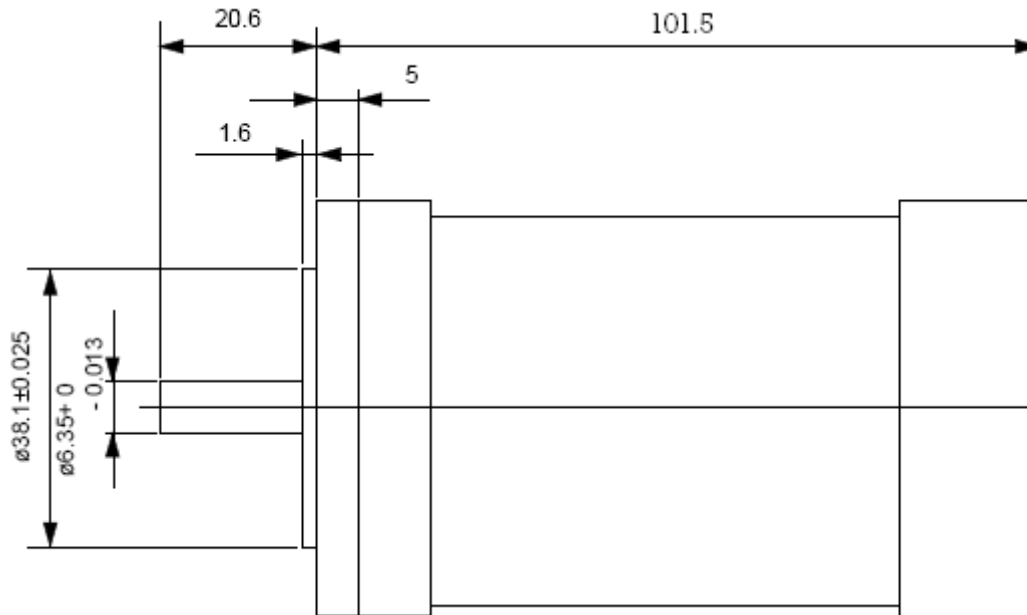
Las características técnicas del motor paso a paso son:

| Tensión nominal (V) | Corriente nominal (I) | Resistencia ( $\Omega$ ) | Inductancia (mH) | Par (mNm)    |                  | Precisión del ángulo |                |
|---------------------|-----------------------|--------------------------|------------------|--------------|------------------|----------------------|----------------|
|                     |                       |                          |                  | de detención | de mantenimiento | de paso (%)          | Angulo de paso |
| 6                   | 1,8                   | 3,5                      | 7,3              | 77,6         | 1.200            | 5                    | 1,8            |

**Tabla 3.1:** Características técnicas del motor

Las dimensiones del motor son:



**Figura 3.5:** Alzado del motor**Figura 3.6:** Perfil del motor

### 3.3.6. Junta de acoplamiento

La función de la junta de acoplamiento es la de absorber los cambios bruscos de giro del motor, tanto en arranque como en frenadas y aceleraciones bruscas. También absorber los impactos axiales y las vibraciones, para que no se transmita al eje del tornillo sin fin. Esta junta también permite un pequeño desalineamiento radial, axial y angular entre los ejes que conecta.

El principio de funcionamiento del acoplamiento se basa en que durante el giro del acoplamiento, el disco transmisor del par de fuerza se acopla alternativamente con los dientes de impulso mecanizados en los tambores de aluminio. Su diseño permite deslizarlo fácilmente para soportar posibles fallos de alineamiento del eje sin que ello suponga fuertes cargas sobre el acoplamiento.

Se ha elegido un acoplamiento del fabricante RULAND. Con un modelo de acoplamiento que consta de dos tambores y un disco de par independientes. La selección del modelo preciso queda restringida por las dimensiones del eje del motor. Éste tiene un diámetro de un cuarto de pulgada, por lo que uno de los tambores tiene que tener de diámetro interno esta medida.

Por otra parte interesa que el otro tambor tenga la máxima medida que permita el modelo. Siendo el modelo de tambor, para ambos, de 25,4 mm diámetro exterior. Uno de 1/4" y otro de 8 mm de diámetro interior.

Para este modelo de tambor de 25,4 mm sólo existen dos tipos de discos, de acetato y de nylon. Se ha seleccionado el disco de acetato al soportar un par mayor que el máximo del motor (1,2 Nm).

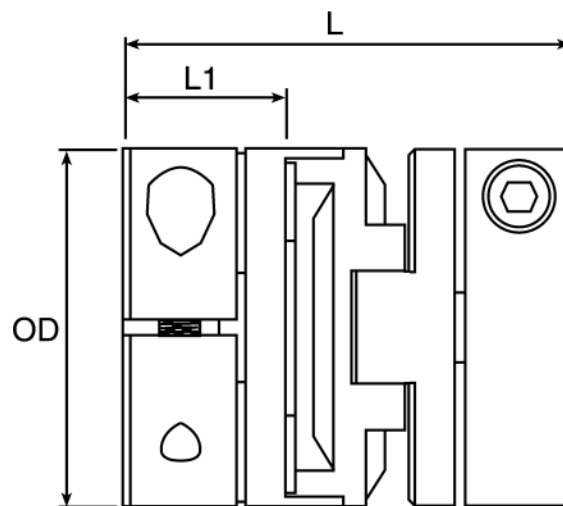
Se han seleccionado el disco con referencia OD16-25-AT y los tambores OCT16-4-A de 6,35 mm y MOCT25-8-A de 8 mm.

Las características técnicas del disco de la junta del acoplamiento son:

| Tamaño de tambor | Material | Par estático | Rigidez torsional | Par de rotura | Angulo | Radial | Axial |
|------------------|----------|--------------|-------------------|---------------|--------|--------|-------|
| (mm)             |          | (Nm)         | (°/Nm)            | (Nm)          | (°)    | (mm)   | (mm)  |
| 25,4             | Acetal   | 4,75         | 0,291             | 19,0          | 0,5    | 0,20   | 0,10  |
|                  | Nylon 11 | 1,13         | 1,11              | 15,9          | 0,5    | 0,20   | 0,10  |

**Tabla 3.2:** Valores del disco del acoplamiento

Las medidas de los dos tambores son:



**Figura 3.7:** Dimensiones de la junta de acoplamiento

| Tamaño de tambor (OD) | Longitud Tambor (L1) | Longitud Acoplamiento (L) | Penetración en eje | Tornillo de fijación |
|-----------------------|----------------------|---------------------------|--------------------|----------------------|
| 25,4                  | 11,9                 | 31,8                      | 11,8               | M3                   |

**Tabla 3.3:** Valores del disco del acoplamiento

### 3.3.7. Activador del motor paso a paso

La función del activador es la de traducir las ordenes del controlador y activar el motor paso a paso.



Se necesita una placa de activación compatible con el motor paso a paso requerido. Esta compatibilidad se tiene al estar preparada la placa para una intensidad de corriente de fase para el motor igual o superior a la requerida por el motor paso a paso. Esta corriente del motor es de 1,8 A

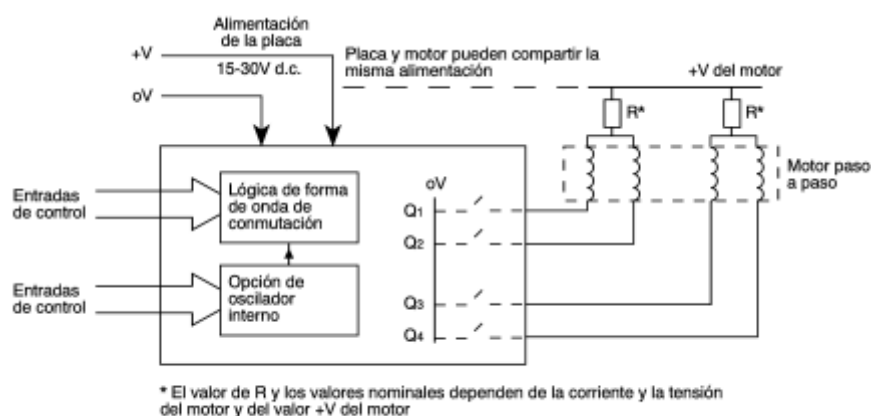
Se ha seleccionado el motor PLACA MONOPOLAR 2A EUROCARD de RS.

La placa de activación tiene una intensidad de corriente de fase para el motor paso a paso de 2 A, permitiendo al motor desarrollarse en su máxima amplitud, al requerir éste una intensidad de 1,8 A. La placa es para motores tetrafásicos unipolares de hasta 30V de corriente continua.

Tiene las dimensiones de una euroboard estándar y se completa con un conector macho de 32 vías, que cumple la norma DIN 41612, para enchufarla a cualquier sistema de rack compatible con tarjetas Eurocard.

Las entradas de control externo son compatibles con las lógicas CMOS y TTL en colector abierto. La salida incorporada de 12V, 50 mA de corriente continua para uso externo, que permite realimentar alguna entrada del activador.

Un esquema de las funciones de la placa es:



**Figura 3.8:** Esquema de funciones del activador

Las características técnicas de la placa de activación son:

|  |   |
|--|---|
| Tensión de alimentación de la placa      | 15-30V d.c. (+10% máx.)                       |
| Corriente de alimentación de la placa    | 60mA  |
| Corriente por fase del motor             | 2A máx.                                       |
| Tensión de alimentación del motor        | 30V d.c. máx.                                 |
| Salida de corriente continua incorporada | 12V d.c., 50mA máx.                           |
| Frecuencia de reloj (paso) de entrada    | 25kHz máx.                                    |
| Entradas de control externo              | anchura de pulso 10ms mín.                    |
|  | Compatible con CMOS y TTL en colector abierto |



|                            |
|----------------------------|
| 0 lógico: 0V 1 lógico: 12V |
|----------------------------|

**Tabla 3.4:** Características técnicas del activador

### 3.3.8. Controlador del motor paso a paso

La función del controlador es dar las órdenes del movimiento exacto al activador del motor paso a paso, indicándole en todo momento la posición, dirección, velocidad y aceleración del motor.

Es de gran importancia para la elección, la velocidad de respuesta del motor tras haber recibido una orden, para tener siempre un control y una gran precisión sobre el motor.

Hay que tener en cuenta la forma de programación que se puede desarrollar, para poder programar las gráficas de los ciclos que va a desarrollar el émbolo. También hay que fijarse en la posibilidad de poder comunicarse con un PC, y la forma de conexión.

El controlador tiene que tener entradas que den acceso a la llegada de señales de los detectores, para ver cuando se da el final de carrera y cambiar el giro del motor. También debe permitir la salida de una señal que vaya a la electroválvula para cambiar la posición de ésta, en el momento que cambie de giro el motor.

Se ha elegido el controlador S116 de CORTEX CONTROLLERS.

La placa de control es capaz de controlar al motor mediante la placa de activación paso a paso, generando señales de dirección y de paso. El controlador cumple la norma DIN 41612, adecuada para tarjetas Eurocard compatibles con sistemas de rack.

La programación se lleva a cabo mediante la producción de caracteres ASCII, desarrollado en un editor de texto y enviando al controlador a través del emulador terminal. Siendo recibidos por el enlace RS232 permiten el control de la dirección, la distancia, la aceleración -deceleración y la velocidad.

La velocidad de transferencia de datos es 1.200 - 9.600 baudios, permitiendo una rápida comunicación con el controlador.

Las características técnicas de la placa controladora son:



|  |  |
|--|--|
| Tensión / corriente de alimentación  | 5V regulados d.c. a 1,5A   |
| Velocidad  | de 63 pasos/s a 250.000 pasos/s es decir de 1/6 de rev./s hacia arriba |
| Margen de posicionamiento  | Hasta 1 entre 2.000.000.000  |
| Período de aceleración/deceleración  | debe producirse en un período de 2s                                    |
| Tensión de las entradas de usuario   | 5-15V  |
| Corriente de la salida de usuario  | Depende de los optoacopladores utilizados                              |
| Tensión /corriente límite  | 5-15V a 2mA  |
| Temperatura de funcionamiento  | de 0° C a 40° C  |
| Margen de aceleración  | de 0,5 pasos/s <sup>2</sup> a 250M pasos/s <sup>2</sup>                |
| Interfaz RS232   |  |
| Xon, Xoff de tres hilos con control de flujo por software  |  |
| 1.200 - 9.600 baudios (7 u 8 bits de datos 1 ó 2 bits de parada, paridad impar, par o sin paridad) |  |
| El espacio nominal en memoria (RAM) para el usuario es de 20K                                      |  |

**Tabla 3.5:** Características técnicas del controlador

### 3.3.9. Fuente de alimentación

La función de la fuente de alimentación es dar una determinada tensión a los distintos componentes eléctricos.

Una fuente de alimentación es un dispositivo o subsistema electrónico que convierte la corriente alterna de la red en otro tipo de corriente adecuada para aplicación que se le vaya a dar. En nuestro caso tomamos corriente de la red a 220 V y queremos transformarla a corriente continua con las amplitudes de 24 V para el activador, 6 V para el motor, 5 V para el controlador, de 12 V a 48 V para los sensores y de 12 V a 24 V para la electroválvula

Las fuentes de alimentación constan de tres o cuatro etapas:

- **Sección de entrada:** compuesta principalmente por un rectificador, también tiene elementos de protección como fusibles, varistores, etc.
- **Regulación:** su misión es mantener la salida en los valores prefijados.
- **Salida:** su misión es filtrar, controlar, limitar, proteger y adaptar la fuente a la carga a la que esté conectada.

Este tipo de fuentes pueden ser tanto lineales como conmutadas.

Las fuentes lineales siguen el esquema: transformador, rectificador, filtro, regulación y salida. En primer lugar el transformador adapta los niveles de tensión y proporciona aislamiento galvánico. El circuito que convierte la corriente alterna en continua se llama rectificador, después suelen llevar un circuito que disminuye el rizado como un filtro de condensador. La regulación se consigue con un componente disipativo regulable. La salida puede ser simplemente un condensador.

Las fuentes conmutadas tienen por esquema: rectificador, conmutador, transformador, otro rectificador y salida. La regulación se obtiene con el conmutador, normalmente un circuito modulador de anchura de pulsos que cambia el ciclo de trabajo. Aquí las funciones del transformador son las mismas que para fuentes lineales pero su posición es diferente. El segundo rectificador convierte la señal alterna pulsante que llega del transformador en un valor continuo. La salida puede ser también un filtro de condensador.

Las ventajas de las fuentes conmutadas obtienen un mejor rendimiento, menor coste y tamaño. Por otra parte las lineales tienen una mejor regulación, velocidad.

Hemos seleccionado una fuente conmutada, por adecuarse mejor a las necesidades.

El motor, la placa de activación y la placa controladora, los detector y la electroválvula están compartiendo la misma fuente de alimentación, por lo que la fuente debe suministrar una corriente que debe ser al menos igual al doble de la intensidad de corriente por fase del motor más la intensidad de corriente de las placas y demás componentes. El motor necesita una intensidad de 1,8 A, la placa de activación 0,06 A, el controlador 0,6 A, los sensores 0,02 A, y 0,003 A de la electroválvula. Por lo que es necesaria una corriente de 4,283 A.

Se ha elegido la fuente de alimentación SWS100-24 del fabricante LAMBDA.

Esta fuente incluye un indicador LED de potencia correcta, protección contra sobretensión y sobrecorriente, detección remota (SWS600), corrector del factor de potencia conforme a norma EN61000-3-2, protección contra transitorios de entrada IEC61000-4.

Las características técnicas de la fuente de alimentación son:

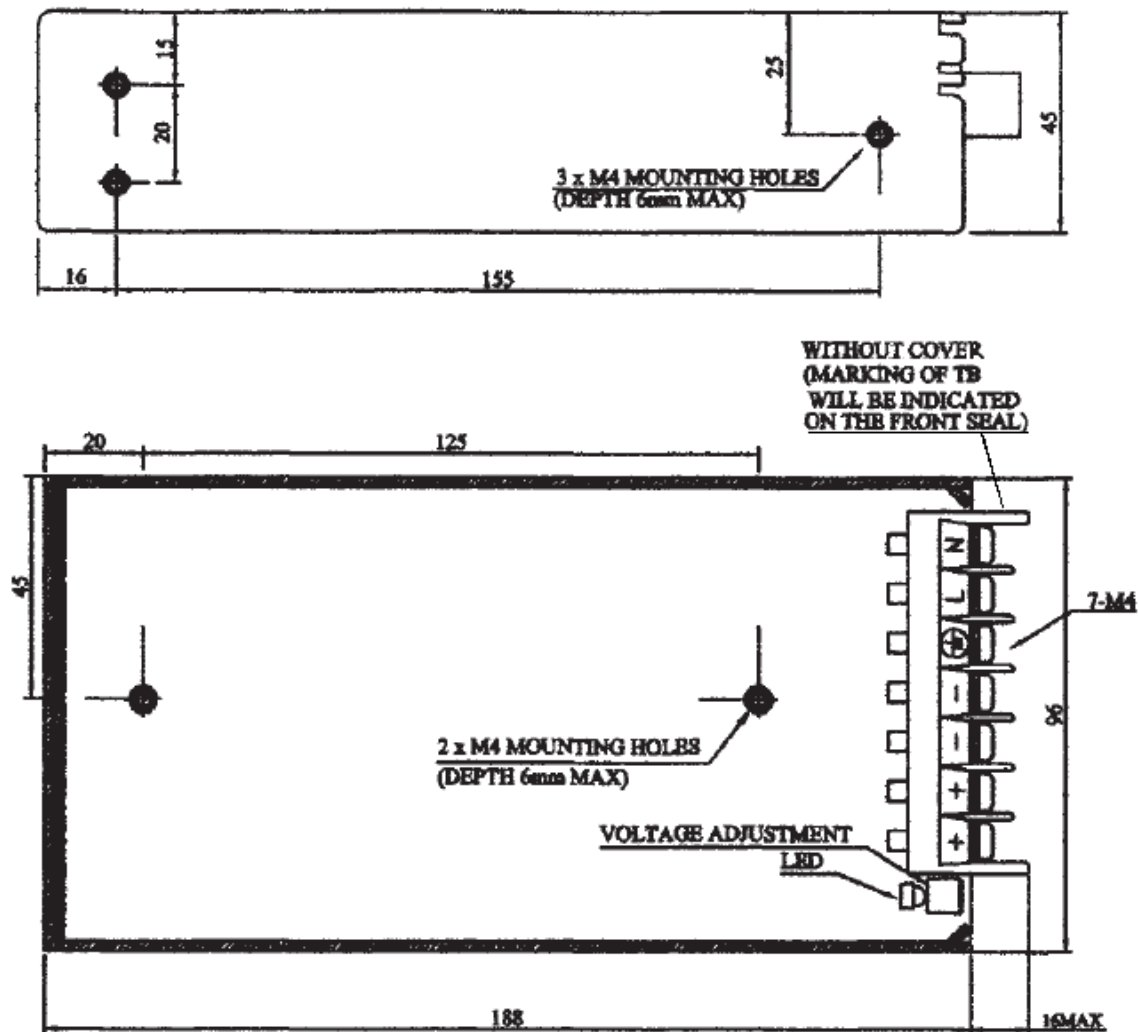
| Tensión de corriente | Intensidad de salida | Regulación de carga | Regulación de línea | Rizado | Margen de ajuste |
|----------------------|----------------------|---------------------|---------------------|--------|------------------|
| (V cc)               | (A)                  | (mV)                | (mV)                | (mV)   | (V)              |
| 24                   | 4,3                  | 144                 | 96                  | 150    | 21,6-26,4        |

**Tabla 3.6:** Características técnicas de la fuente de alimentación

| Tensión de entrada | Potencia de salida | Peso    | Dimensiones Alt. x Anch. x Prof. | Temperatura de funcionamiento |
|--------------------|--------------------|---------|----------------------------------|-------------------------------|
| 85-265(V ac)       | 100 (W)            | 600 (g) | 96x45x188 (mm)                   | de -10° a +60° (C)            |

**Tabla 3.7:** Características generales de la fuente de alimentación

Las dimensiones de la fuente de alimentación son:

**Figura 3.9:** Dimensiones de la fuente de alimentación

### 3.3.10. Soporte

En el diseño de la estructura se ha basado en la elección del material y el diseño de la geometría y dimensiones para soportar las cargas. El soporte del presente proyecto se puede dividir en dos: por una parte, la estructura que va resistir el conjunto del cilindro y del motor, y por otra parte, el soporte de todos los componentes incluido el anterior.

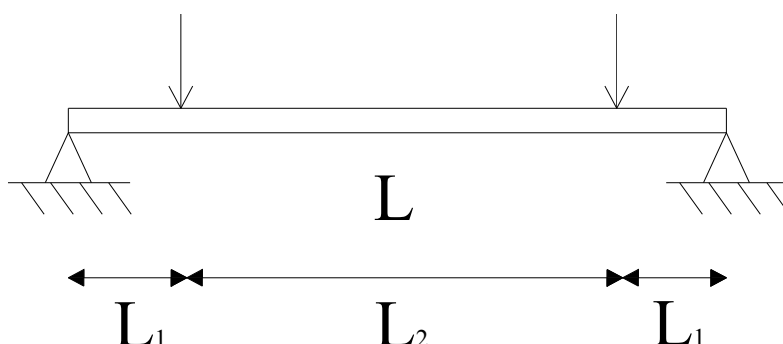
## SOPORTE DEL CONJUNTO CILINDRO Y DEL MOTOR

Los materiales seleccionados para la estructura que soporta el conjunto del cilindro y el motor es de aluminio y acero inoxidable, materiales con características suficientes para aguantar los esfuerzos a los que se ve sometido: el peso de los componentes, vibraciones, inercias, esfuerzos axiales y tangenciales que recibe del motor y de sus transmisiones.

El soporte del conjunto del cilindro y del motor tiene las dimensiones y geometría que se adjuntan en los planos. Ver Anexo Planos 7, 8, 9,10.

- El soporte del conjunto del cilindro está compuesto de una lámina horizontal, con dos láminas perpendiculares empotradas en sus extremos, con unos refuerzos para asegurar su anclaje a la horizontal, todo ello de aluminio. Las láminas verticales están unidas por unos ejes de acero inoxidable, que sirve para que no haya un desplazamiento axial. Las láminas perpendiculares sirven de apoyo a dos barras de acero inoxidable, que tendrán las funciones de: sujetar el conjunto del cilindro por la zona de las tapas, alinear todo el conjunto, y servir como guías al émbolo.

Para el cálculo de la resistencia de las barras ante la carga del conjunto del cilindro, se simplifica su geometría a la de una viga apoyada en sus extremos.



**Figura 3.10:** Esfuerzos a los que está sometido las barras

El esfuerzo sufrido por las barras es:

$$\sigma_g = \frac{M_y \cdot z}{I_y}$$

$$\begin{aligned}
 M_y : \quad & x < L_1 & M_y = \frac{P}{2} \cdot x & M_{y \text{ máx}} (x=L_1) \\
 & L_2 < x < L_1 & M_y = \frac{P}{2} \cdot x - \frac{P}{2} \cdot (x - L_1) = \frac{P}{2} \cdot L_1 \\
 & & M_{y \text{ máx}} = \frac{P}{2} \cdot L_1
 \end{aligned}$$

P (peso del conjunto del cilindro lleno) = 12 kg

$L_1$  (longitud del soporte a la tapa) = 111,75mm

$$M_{y \text{ máx}} = \frac{P}{2} \cdot L_1 = \frac{12}{2} \cdot 111,75 = 670,5$$

z (es igual al radio) = 6 mm

$$I_y = \frac{\pi \cdot d^4}{64} = \frac{\pi \cdot 12^4}{64} = 1017,876 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_g = \frac{M \cdot z}{I_y} = \frac{670,5 \cdot 6}{1017,876} = 3,952 \text{ kg/mm}^2$$

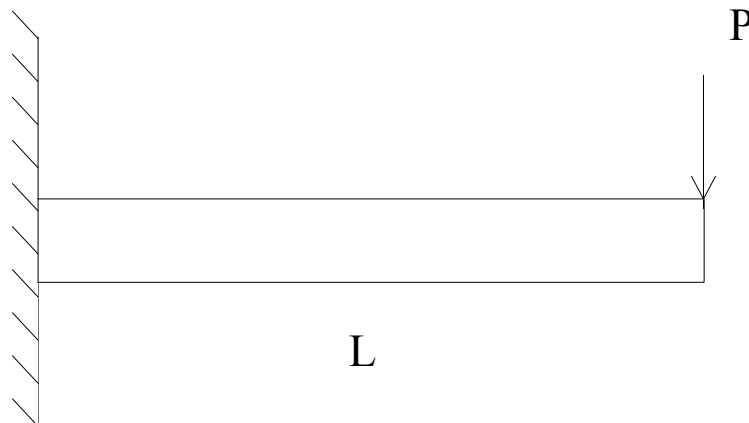
$$\sigma_g = 3,952 \text{ kg/mm}^2 < \sigma_u = 25 \text{ kg/mm}^2 \text{ (límite elástico del acero inoxidable)}$$

Las barras del soporte aguantan el peso del cilindro.

Las barras tendrán en cada extremo unas piezas de latón alargadas que van desde las tapas a la estructura vertical de aluminio, recubriendo en este tramo a las barras, ajustando el conjunto a la estructura para bloquear el movimiento longitudinal. También tienen como función, mediante la incorporación de unas juntas tóricas en la zona en contacto con las tapas, asegurar que no haya fugas del fluido. El alojamiento de las juntas tóricas de 2 mm, sacadas de las tablas Epidor, es triangular de 2mm  $\times$  45°, con una calidad superficial de H7.

- El soporte del motor está constituido por una lámina perpendicular y cuatro vigas que van sujetas a uno de las láminas perpendiculares del estructura del conjunto del cilindro.

Para el cálculo de la resistencia de las vigas ante la carga del peso del motor y la lámina, se simplifica su geometría a la de una viga empotrada en uno de sus extremos y una carga puntual en el otro.



**Figura 3.11:** Esfuerzos a los que está sometido las vigas del soporte del motor

El esfuerzo sufrido por las vigas es:

$$\sigma_v = \frac{M \cdot z}{I_y}$$

M (Momento que se ejerce sobre la parte empotrada) =  $P \cdot L$

L (longitud de la viga) = 50 mm

P (peso del motor y la lámina) = 4kg

$$M_y = P \cdot L = 200 \text{ kg} \cdot \text{mm}$$

z (es igual al radio) = 7 mm

$$I_y (\text{momento de inercia del émbolo}) = \frac{\pi \cdot d^4}{64}$$

$$I_y = \frac{\pi \cdot d^4}{64} = \frac{\pi \cdot 14^4}{64} = 1885,7 \text{ mm}^4$$

$$\sigma_v = \frac{M \cdot z}{I_y} = \frac{M \cdot 7}{1885,7} = 0,7424 \text{ kg/mm}^2$$

$$\sigma_v = 0,7424 \text{ kg/mm}^2 < \sigma_u = 25 \text{ kg/mm}^2 \text{ (límite elástico del acero inoxidable)}$$

## SOPORTE GENERAL

El soporte general está constituido con la función aguantar y alojar todos los componentes del presente proyecto.

Esta estructura está compuesta de perfiles de aluminio del fabricante Nikai.

El material de estos perfiles tiene las siguientes características técnicas:

| Materia prima       | Módulo de elasticidad          | Dureza Brinnel | Anodizado | Espesor anodizado |
|---------------------|--------------------------------|----------------|-----------|-------------------|
| ISO AlMgSi 0,5 F 25 | E = 70.000 N / mm <sup>2</sup> | 74 HB          | NA / SQ   | 15 $\mu$          |

**Tabla 3.8:** Características técnicas del material del perfiles

Se a seleccionado el perfil de 45 x 45 mm con la referencia 110 504.

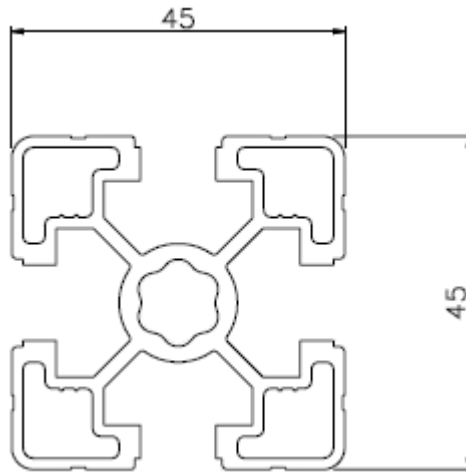
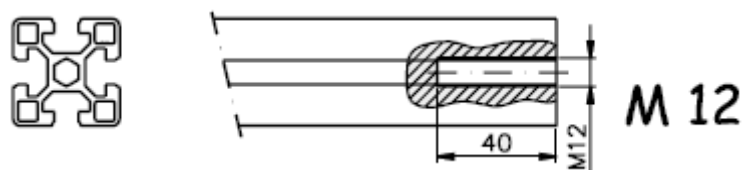
Las características técnicas de perfil son:



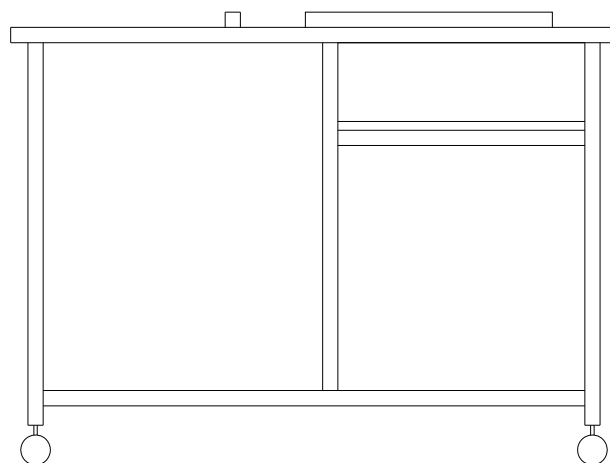
| Aluminio anodizado | Sección                | Peso                   | Momento de Inercia                                       |
|--------------------|------------------------|------------------------|--|
|                    | $a = 561 \text{ mm}^2$ | $m = 1,5 \text{ Kg/m}$ | $I_x = 10,70 \text{ cm}^4$<br>$I_y = 10,70 \text{ cm}^4$ |

**Tabla 3.9:** Características técnicas del perfil

Las formas del perfil y las dimensiones son:

**Figura 3.12:** Dimensiones del perfil**Figura 3.13:** Dimensiones del perfil

La estructura global tiene la siguiente forma:

**Figura 3.14:** Estructura global

El soporte tiene las dimensiones y geometría que se adjuntan en los planos. Ver Anexo Plano 11.

Albergando en la parte derecha los soportes del conjunto del cilindro y motor, en la parte izquierda va el depósito. En la tercera barra de la izquierda va alojada la electroválvula. Los componentes electrónicos van alojados en la parte de abajo a la derecha, menos el activador que va arriba junto a los soportes y al motor.

### 3.3.11. *Detector de fin de carrera*

La función que tiene el sensor es el detectar el fin de carrera del émbolo y cambiar de sentido movimiento de éste al cambiar el sentido de giro del motor, enviando una señal al controlador del motor paso a paso. También envía una señal a la electroválvula para accionar su muelle y poner su otra vía.

La selección del sensor está basada en el cumplimiento de ciertas condiciones. Una primera condición es el medio en que se va a encontrar, hallándose sumergido en agua, condicionando mucho la selección del tipo de sensor, al tener que cumplir la normativa IP68 (esto significa estanquidad al polvo y protección contra inmersiones prolongadas en agua).

Para que cumpla esta condición el sensor, se limita prácticamente, al uso de un detector de posición por inducción. Esto consiste en un detector de posición electrónico, que da una señal de salida sin contacto mecánico directo, la detección se fundamenta en el fenómeno de inducción electromagnética. El módulo de detección cumple tres funciones: producir el campo magnético alterno de excitación, detectar la energía degradada en la placa, accionar el módulo de conmutación. Al acercarse la placa varía la reluctancia magnética del conjunto, hasta que llega un momento en que la oscilación desaparece, detectándose la placa.

Se necesita un diámetro mínimo para que estos sensores puedan ser sumergibles, que tiene que ser superior o igual a 12 mm. Aunque, por otra parte nos interesa que sea del menor diámetro para no debilitar demasiado la estructura de las tapas del cilindro. Así que se selecciona un diámetro del detector de métrica de 12 mm.

El tipo de alimentación del detector es de corriente continua, adecuada a la fuente de alimentación seleccionada.

Para que cumpla la normativa IP68, tiene que ser el sensor por cable y no por conector. Se tiene que elegir el cable entre dos hilos o tres. El problema de elegir el uso de dos hilos son los posibles efectos eventuales de la corriente y la tensión residuales en el accionador o en la entrada conectada, y los detectores que no están protegidos contra las sobrecargas ni los cortocircuitos. En cambio los cables de tres hilos tienen protección contra la inversión de polaridad, protección contra las sobrecargas y los cortocircuitos, no tienen corriente residual, y con una baja tensión residual. Seleccionando el cable de tres hilos para una mayor capacidad de uso del sensor.



Se selecciona NA (normalmente abierto), utilizándose para que se emita una señal al acercarse el émbolo (mientras que el tipo NC, normalmente cerrado, emite todo el rato la señal y cuando se acerca la pieza deja de hacerlo)

También se tiene que escoger entre PNP y NPN, depende de los integrados de la placa del controlador del motor paso a paso. Se usa un PNP para obtener una conmutación de la carga del potencial positivo.

Hay un detector situado en cada tapa del cilindro, estando empotrado en ella y permaneciendo a la misma altura que la tapa.

Se ha escogido el detector de Telemecanique XS612B1PAL2.

Las características técnicas del detector de posición son:

|                                  |                    |
|----------------------------------|--------------------|
| Salida                           | PNP - NA           |
| Tensión nominal de alimentación  | 10-36Vd.c.         |
| Capacidad de conmutación         | 200mA              |
| Frecuencia máxima de conmutación | 2,5kHz             |
| Distancia nominal de detección   | 4mm                |
| Temperatura de funcionamiento    | de -25° C a +70° C |
| Dimensiones (mm)                 | M12 × 50           |
| Grado de estanqueidad            | IP68               |

**Tabla 3.10:** Características técnicas del detector de posición

Para calcular el alcance del detector usamos la siguiente formula:

$$S_a = S_n \cdot K_q \cdot K_m \cdot K_d \cdot K_t$$

$$S_n \text{ (alcance nominal)} = 4 \text{ mm}$$

$$K_q \text{ (constante que depende de la temperatura, } T \approx 20^\circ \text{ C)} = 0,99$$

$$K_m \text{ (constante que depende del material, acero inoxidable)} = 1$$

$$K_d \text{ (constante que depende de las dimensiones de la pieza a detectar)} = 0,95$$

El sensor tendrá que detectar una pequeña pieza de acero inoxidable de 20 mm de diámetro que sobresale de la superficie del émbolo, pero no con el mismo centro que el sensor, sino a una distancia de 5,5 mm de su centro. Esto equivaldría, aproximadamente a una pieza de 9 mm si tuviera el mismo centro que el detector.  $K_d$  está en función el número de veces que es mayor la pieza al alcance nominal, en nuestro caso es de 2,25 siendo  $k_d = 0,95$

$$K_t \text{ (constante de corrección de la tensión)} = 0,9$$

$$S_a = S_n \cdot K_q \cdot K_m \cdot K_d \cdot K_t = 4 \cdot 0,99 \cdot 1 \cdot 0,95 \cdot 0,9 = 3,39 \text{ mm}$$

Se obtiene que el alcance de trabajo del detector es de 3,39 mm

El número de ciclos aproximados que puede desarrollar el émbolo sobre el tornillo sin fin es de:

El recorrido de rosca útil es de 253 mm, por lo que el émbolo, con unas dimensiones de 51 mm de ancho, tiene un recorrido de 202 mm. A esto hay que restar la distancia que detecta antes el sensor de tocarlo el émbolo, siendo 6,78 mm. Por lo que realmente el recorrido del émbolo es de 195,22 mm. El paso del tornillo sin fin es de 2 mm, haciendo el motor 200 pasos por vuelta, por lo que 195,22 mm de recorrido permiten al motor que desarrolle 19522 pasos. Se necesita 80 medios pasos para completar un ciclo. Por lo que el recorrido que realiza el émbolo permite desarrollar 488 ciclos.

### 3.3.12. Conexiones rápidas

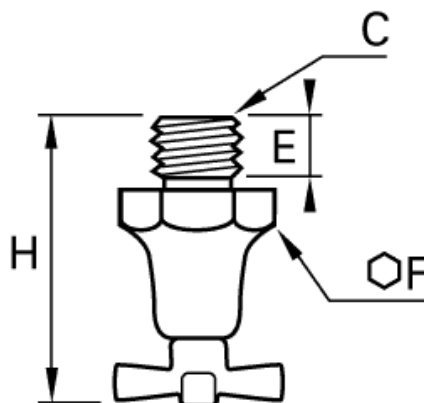
Se utiliza varias conexiones rápidas en ambas tapas para poner en contacto el fluido de dentro del cilindro con el exterior. Estas conexiones son dos purgas, dos racores y un tapón, en cada tapa.

Cumplen las funciones de la limpieza de cuerpos sólidos y de aire las purgas. Los racores conectan el cilindro a las tuberías, y adaptan las dimensiones del agujero de las tapas al diámetro de las tuberías. El tapón sirve para que no salga el fluido de uno de los racores, siendo este agujero de seguridad, si posteriormente se necesitase.

#### PURGA

Se ha seleccionado la purga 0562 GRIFOS DE PURGA DE PUNZON, MACHO BSP CIL. Y MÉTRICA de LEGRIS.

Las dimensiones de las purgas son:



**Figura 3.15:** Alzado de la purga

| C    | E    | F    | H    | H máxima | Masa |
|------|------|------|------|----------|------|
|      | (mm) | (mm) | (mm) | (mm)     | (kg) |
| G1/8 | 8    | 16   | 36   | 40       | 0.03 |

**Tabla 3.11:** Dimensiones de las purgas

Las características técnicas de la purga son:

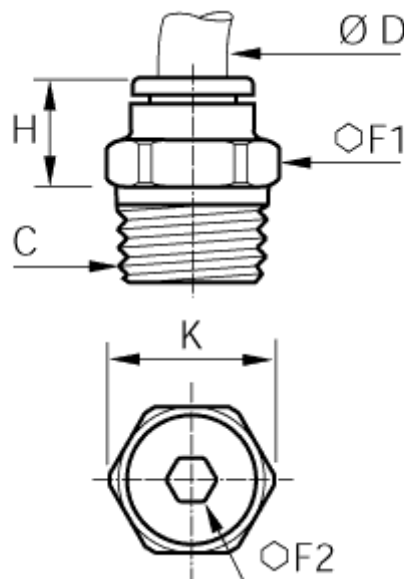
| Presión máxima de servicio (MPa) | Temperatura de utilización (° C) | Cuerpo | Maneta |
|----------------------------------|----------------------------------|--------|--------|
| 12                               | de -20 a 100                     | Latón  | Latón  |

**Tabla 3.12:** Características técnicas de la purga

## RACOR

Se ha seleccionado la purga 3175 12 13 RACOR DE ENTRADA, RECTO ROSCA MACHO BSP CON. Y NPT de LEGRIS.

Las dimensiones del racor son:

**Figura 3.16:** Alzado y planta del racor

| ØD    | C     | F <sub>1</sub> | F <sub>2</sub> | H    | K    | Masa |
|-------|-------|----------------|----------------|------|------|------|
| (inc) |       | (mm)           | (mm)           | (mm) | (mm) | (kg) |
| 12    | R 1/4 | 19             | 7              | 26,5 | 21   | 0.03 |

**Tabla 3.13:** Dimensiones de las purgas

Las características técnicas del racor son:

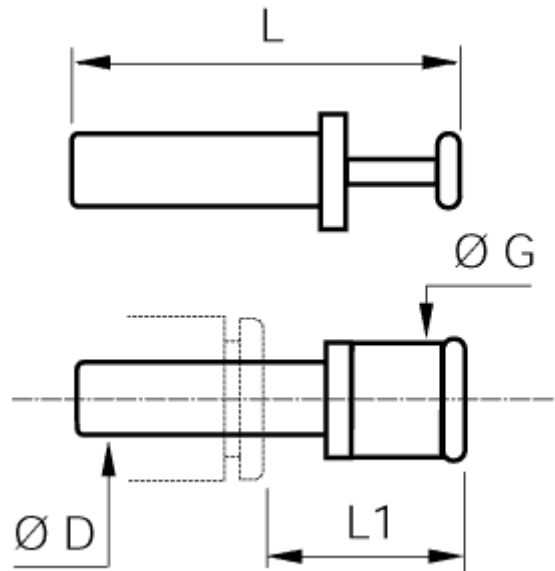
| Presión máxima de servicio (MPa) | Temperatura de utilización (° C) | Resistencia al vacío (mm Hg) | Cuerpo          | Juntas  | Arandela         |
|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------|---------|------------------|
| 2                                | de -20 a 80                      | 755                          | Latón niquelado | Nitrilo | Acero inoxidable |

**Tabla 3.14:** Características técnicas del racor

## TAPÓN

Se ha seleccionado la purga 3126 12 00 TAPÓN de LEGRIS.

Las dimensiones de las purgas son:



**Figura 3.17:** Alzado y planta del tapón

| ØD   | ØG   | L    | L1   | Masa  |
|------|------|------|------|-------|
| (mm) | (mm) | (mm) | (mm) | (kg)  |
| 12   | 14   | 42   | 21   | 0.005 |

**Tabla 3.15:** Dimensiones de las purgas

Las características técnicas de la purga son:



| Presión máxima de servicio (MPa) | Temperatura de utilización (° C) | Resistencia al vacío (mm Hg) | Cuerpo        |
|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------|
| 2                                | de -20 a 80                      | 755                          | Polímero H.R. |

**Tabla 3.16:** Características técnicas de la purga

### 3.3.13. Conductos

La función de los conductos es la de transportar el fluido a las distintas zonas deseadas.

Estos tienen una gran importancia en el diseño, ya que en función del diámetro interior que tengan, varía mucho la diferencia de presión que hay sobre el fluido. El diámetro elegido es de 10 mm.

Hay cuatro tramos de conductos. Dos de estos tramos van desde sendas tapas del cilindro hasta la electroválvula. Estos conductos van en un sentido o en otro en función del sentido de desplazamiento que desarrolle el émbolo.

Los otros dos conductos tienen un sentido único. Parte un conducto de la electroválvula llegando hasta el depósito. Este conducto se sustituirá por unas secciones que simulen una arteria con ciertas enfermedades, cuando se desarrollen los estudios.

La otra sección realimenta el sistema, cogiendo el fluido del depósito y llevándolo al último orificio de la electroválvula.

Se necesita una longitud de 300 mm de conducto para el primer tramo, 900 mm para el segundo, 400 mm para el tercero y 400 mm para el cuarto tramo.

Se requiere un material con flexibilidad suficiente que permita sustituir los codos los conductos a curvas suaves. Se ha seleccionado el material polietileno, que permite esta condición.

Se ha seleccionado los conductos 1100Y 12 00 TUBO POLIETILENO de LEGRIS.

Las dimensiones del racor son:

| ØExt | ØInt | Masa   |
|------|------|--------|
| (mm) | (mm) | (kg/m) |
| 12   | 10   | 0.04   |

**Tabla 3.17:** Dimensiones de las purgas

Las características técnicas del racor son:

- La temperatura de utilización es de de -40 a 60° C.
- La presión máxima depende de la temperatura y del tipo de conexión.

### 3.3.14. *Depósito*

La función del depósito es la de permitir cierta holgura en la capacidad del sistema.

El diseño del depósito se ha basado en el volumen mínimo que debe tener y en el material del cual está constituido para soportar los esfuerzos.

Para diseñar el volumen del depósito, se calcula el volumen de las instalaciones. Para ello se calcula primero el del cilindro, siendo igual a:

$$V_{\text{cilindro}} = \pi \cdot 0,092^2 \cdot 0,270 = 7,18 \text{ dm}^3 = 7,18 \text{ l}$$

A este valor habría que sumarle la cantidad de fluido que se encuentra en las tuberías, para obtener el cálculo de fluido en las instalaciones.

Se ha seleccionado un depósito con una capacidad de 15 litros, superando realmente la capacidad necesaria, pero sin influir negativamente, ya que no afecta al incremento de perdidas de carga. El material del depósito es PVC, soportando los esfuerzos que le ejerce el fluido.

### 3.3.15. *Electroválvulas*

La función de la electroválvula es la de invertir la dirección de los conductos, con el fin de tener siempre el mismo sentido en un tramo de la instalación, para realizar diferentes estudios.

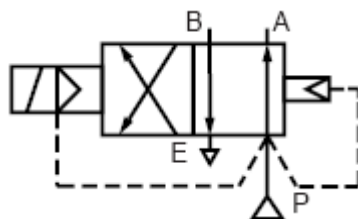
Se ha elegido este tipo de válvula al accionarse automáticamente con una señal eléctrica, dada por el controlador, al llegar el émbolo al final de carrera.

El tipo de válvula necesaria es de cuatro vías y dos posiciones (4/2). Un conducto que sale del cilindro va a la sección de ensayos, y otro conducto que sale del cilindro va a la salida del depósito. El cambio de posición sería el cruzar la conexiones, donde estaba una salida del cilindro se coloca la otra y viceversa.

Se ha elegido la válvula de regencia SC B344A070 de ASCO.

El esquema que tiene la electroválvula es:



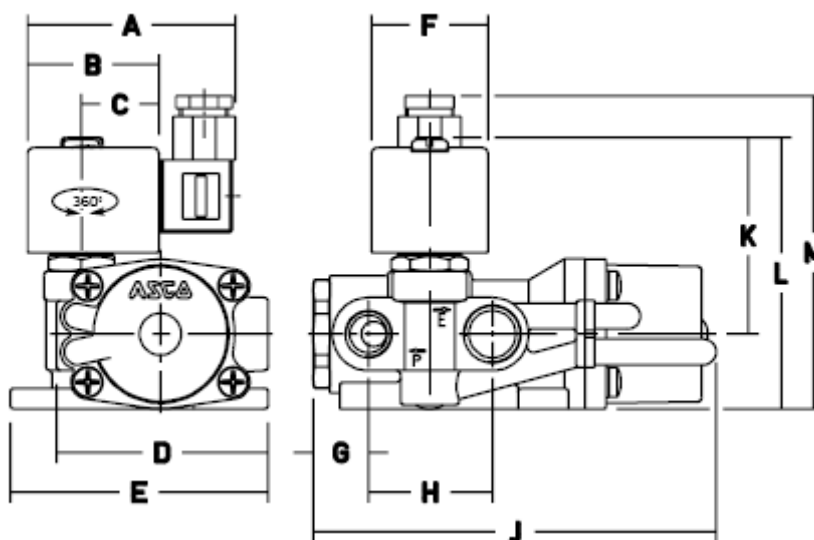
**Figura 3.18:** Esquema de la válvula

Las características técnicas de la electroválvula son:

| Ø<br>racor-<br>daje |        | Ø<br>de<br>paso | coeficiente<br>de caudal<br>Kv |         | presión diferencial admisible<br>(bar) |          |          |          |          |            |   |
|---------------------|--------|-----------------|--------------------------------|---------|--|----------|----------|----------|----------|------------|---|
| entrada             | escape |                 |                                |         | min.                                   | máxima   |          |          |          |            |   |
|                     |        |                 |                                |         |  | aire (*) |          | agua (*) |          | aceite (*) |   |
| NPT                 |        | (mm)            | (m³/h)                         | (l/min) | ~      =                               |          | ~      = |          | ~      = |            |   |
| 1/4 3/8             |        | 6.4             |                                | 11.6    | 0,7                                    | 9        | 9        | 9        | 9        | 9          | 9 |

**Tabla 3.18:** Características técnicas de la electroválvula

Las dimensiones de la electroválvula son:

**Figura 3.19:** Dimensiones de la válvula

| código<br>SC B344 | A  | B  | C  | D  | E   | F  | G  | H  | J   | K  | L   | M   |
|-------------------|----|----|----|----|-----|----|----|----|-----|----|-----|-----|
| A070 (=)          | 80 | 50 | 30 | 80 | 108 | 45 | 18 | 36 | 121 | 79 | 103 | 120 |

**Tabla 3.19:** Valores de las dimensiones de la válvula

## 4. CONEXIONES

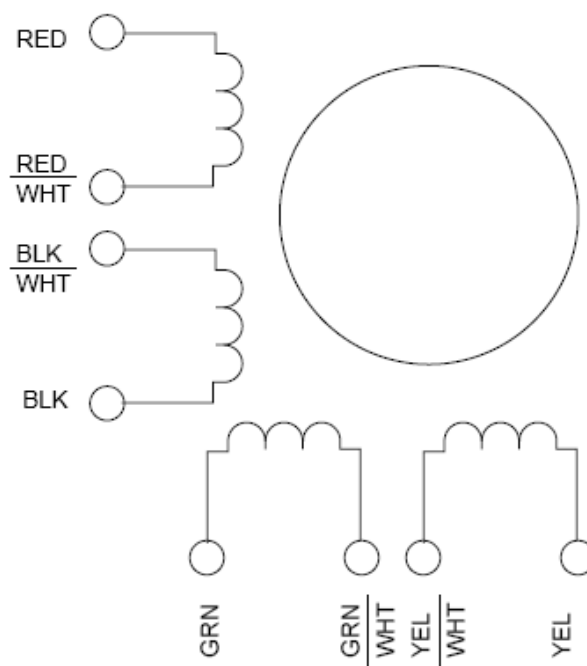
Para la realización de la instalación se han diseñado las conexiones eléctricas entre los distintos dispositivos electrónicos y eléctricos.

Las conexiones comienzan en un ordenador, el cual está conectado a una placa controladora a través de un puerto RS-232, por el cual le envía los datos programados. La placa controladora está conectada a la placa de activación, traduciéndole la programación y enviándole los pulsos de reloj y el sentido que debe de seguir el motor. La placa de activación envía los impulsos eléctricos al motor para que este realice el pulso programado.

La placa controladora también está conectada a los detectores de final de carrera y a la electroválvula. Los sensores envían una señal a la placa cuando detectan el final de carrera del émbolo, provocando que cambie de posición de sus vías la electroválvula, y que cambie de sentido de giro el motor. Todos estos componentes reciben electricidad mediante fuentes de alimentación conectadas a la red.

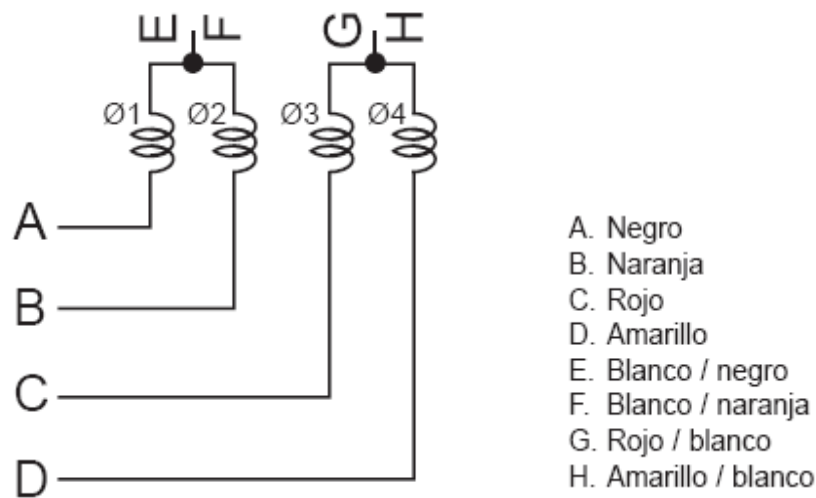
### 4.1. Motor paso a paso

El motor paso a paso seleccionado esta compuesto por un rotor y una serie de bobinas que con impulsos eléctricos le hacen girar. En nuestro caso, el motor tiene cuatro bobinas, como muestra la siguiente figura, indicando las conexiones internas entre los distintos cables y los bobinados del motor:



**Figura 4.1:** Esquema de la conexión del activador

El esquema de las conexiones del motor es:



**Figura 4.2:** Esquema de la conexión del motor

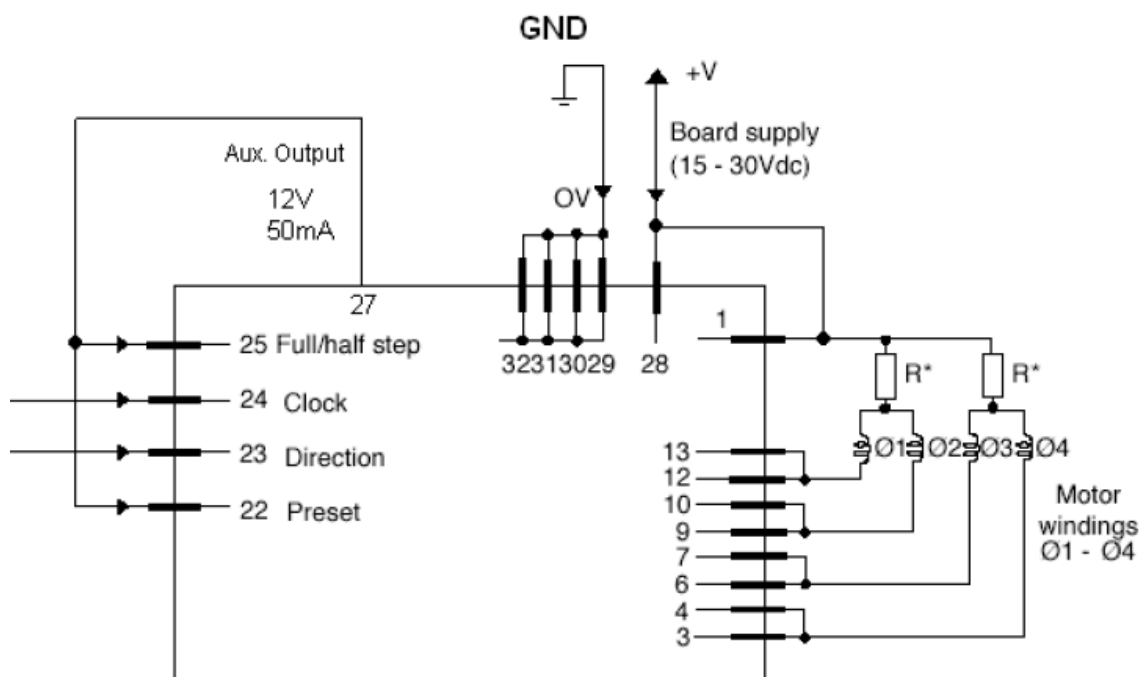
En donde cada cable va conectado a:

A, B, C, D: son los cables que van conectados a la placa de activación.

E, F, G, H: son los cables que van conectados a la alimentación.

## 4.2. Activador del motor paso a paso

El esquema de las conexiones de la placa de activación es:

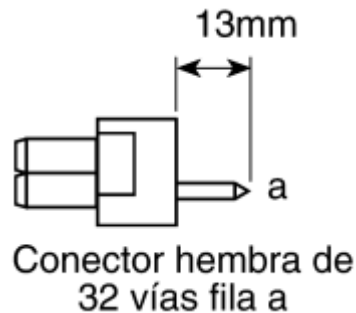


**Figura 4.3:** Esquema de la conexión del activador

Los números que se muestran son el número del pin de la placa accionadora.

Se ha incluido un conector a estos pines para poder realizar fácilmente las conexiones eléctricas, siendo un conector estándar de 32 vías DIN 41612. Este conector tiene la referencia 8609.132.61.14.7x5.000E2 de FCI CONNECTORS.

El esquema del conector de la placa de activación es:



**Figura 4.4:** Perfil del conector de la placa de activación

Las características técnicas del conector son:

| Conector                                | Macho   | Hembra           |
|---|---|------------------|
| Material de contacto                    | Latón   | Bronce fosforoso |
| Recubrimiento del contacto              | Oro sobre níquel                                  |                  |
| Aislante                                | Poliéster UL94V-0                                 |                  |
| Resistencia de aislamiento              | $\geq 10^{12} \Omega$                             |                  |
| Resistencia de contacto                 | $\leq 15 \text{ m}\Omega$                         |                  |
| Temperatura de funcionamiento           | de $-65^{\circ}\text{C}$ a $+125^{\circ}\text{C}$ |                  |
| Tensión de prueba entre contactos       | 1kV rms   |                  |
| Tensión de prueba de contacto a tierra  | 1,5kV rms   |                  |
| Corriente nominal                       | 2 A máximo  |                  |
| Fuerza de inserción/ extracción por vía | 95g   |                  |

**Tabla 4.1:** Características técnicas del conector

La conexión de la placa de activación con el motor es a través de los siguientes pines:

12, que se conecta con el cable rojo del motor.

10, que se conecta con el cable negro del motor.

7, que se conecta con el cable amarillo del motor.

4, que se conecta con el cable verde del motor.

La conexión hacia la fuente de alimentación se realiza mediante los pines:

28, que se conecta al conector positivo.

30, que se conecta a masa.

Además, si se utiliza la misma alimentación entre el activador y el motor (como es aconsejable, para utilizar todo el potencial del motor), primero hay que tener en cuenta que se necesitan alimentaciones distintas: la placa 24 voltios y el motor 6, ambas de corriente continua. Para solucionar esto es necesario utilizar unas resistencias, estas tendrán el valor de:

$$R = \frac{V_{cc} - V_{motor}}{I_{motor}} = \frac{24 - 6}{1,8} = 10 \, \Omega$$

$$W = V \cdot A = 18 \cdot 1,8 = 33 \, w$$

La conexión de estas resistencias con el motor se realiza con la unión del cable rojo/blanco y el negro/blanco a un extremo de una resistencia, y el cable amarillo/blanco y el blanco/naranja a un extremo de otra resistencia. Los extremos libres de las dos resistencias se unen al pin 1 del activador. Para que tengan la misma alimentación la placa y el motor se tiene que cablear el pin 1 y el pin 28 de la placa.

Se necesita definir los parámetros al activador para mover al motor, estos parámetros son el sentido y los pulsos de reloj, que van a definir la velocidad, aceleración,... del motor. También se permite definir si se va mover el motor con el modo de medio paso o de paso completo, y el preajuste para definir si el motor gira según los pulsos de reloj o fijando los estado del motor.

Se define de forma permanente la elección del modo de medio paso o de paso completo y el preajuste. Siendo la lógica de conmutación de éstos igual el nivel 1 a 12 V de corriente continua y el nivel 0 a 0 V. Esta alimentación se puede realizar mediante la salida 27 de la placa de activación que genera 12 V.

Las opciones de los cuatro parámetros del activador, que definen el movimiento del motor son:

- Para el modo de paso, si se conecta el control lógico al nivel 1 se obtiene un avance de un paso sobre el motor por cada ciclo de reloj. Si se conecta el nivel 0 se obtiene un avance de medio paso por cada ciclo de reloj. Conectándose de forma permanente el nivel 1, al desarrollar una mayor fuerza el motor.

- Para la señal de reloj se obtiene un avance de un paso o medio paso en el motor por cada ciclo de reloj (en el flanco de bajada).

- El sentido de giro queda definido, si se conecta el nivel 1 se obtiene un sentido determinado de giro y si se conecta el nivel 0 se obtiene el sentido contrario.

- El preajuste queda definido, si se conecta el nivel 1, la placa opera de forma normal con la señal de reloj. Si se conecta el nivel 0 la placa alimenta el motor con un solo bobinado de forma constante. Conectándose de forma permanente el nivel 1, para tener un control completo del motor.

Por lo que los pines que hace falta definir en la placa de activación para el control del motor son:

22: define el preajuste, va conectado a la salida 27.

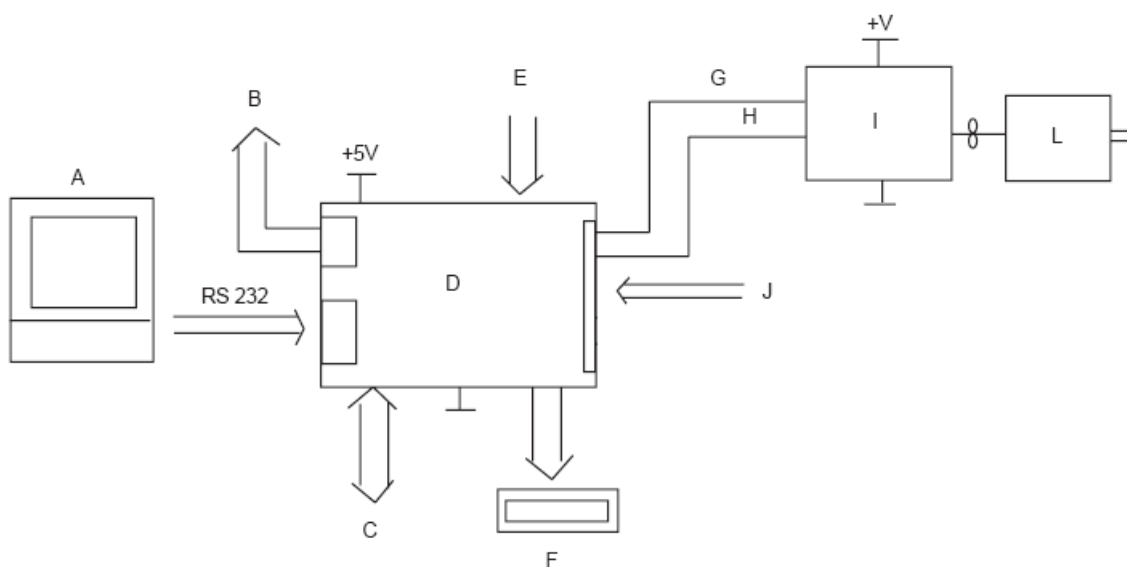
23: define la dirección, va conectado al controlador.

24: define los pulsos de reloj, va conectado al controlador.

25: define el modo de paso, va conectado a la salida 27.

### 4.3. Controlador del motor paso a paso

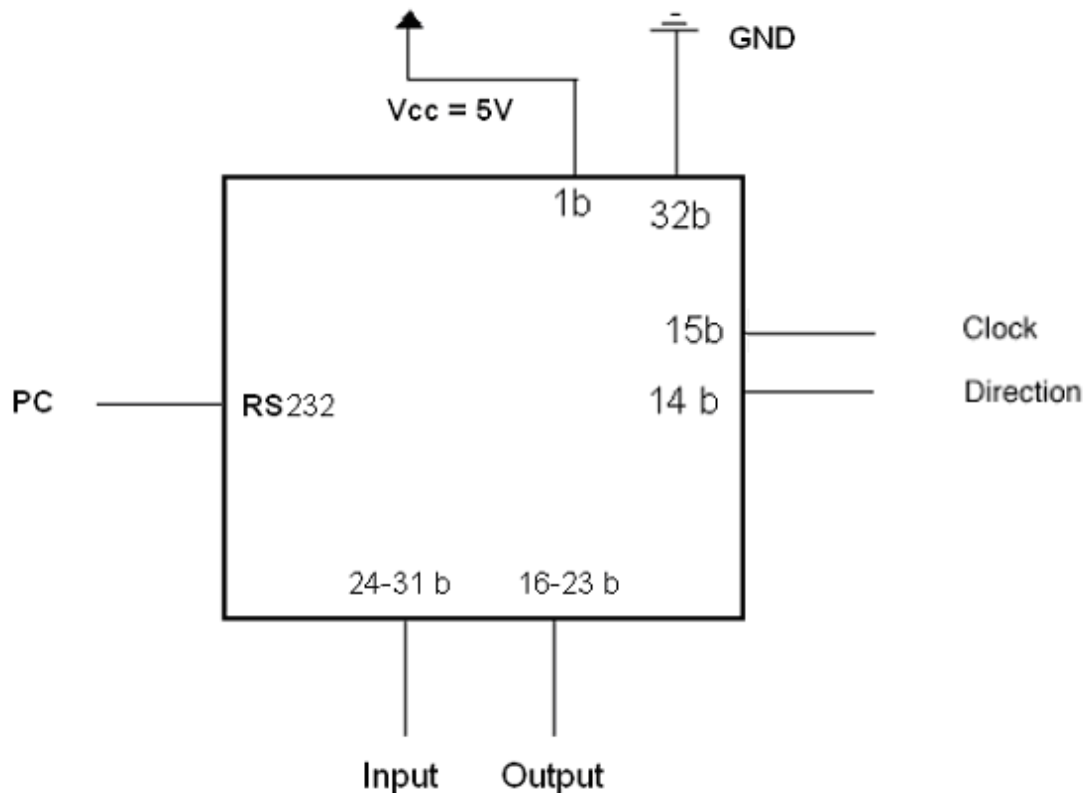
Las posibles conexiones de la placa controladora son:



- A. Ordenador personal
- B. RS232 con la tarjeta de control de motor paso a paso dos
- C. 8 Entradas 8 salidas, E/S del usuario
- D. Tarjeta de control paso a paso 1
- E. Pontenciómetro digital o rató para control manual
- F. Pantalla alfanumérica
- G. Senito
- H. Paso
- I. Accionamiento paso A
- J. Limites (cableados)
- L. Motor paso A

**Figura 4.5:** Esquema de las posibles conexiones del controlador

El esquema de las conexiones necesarias de la placa controladora del motor es:

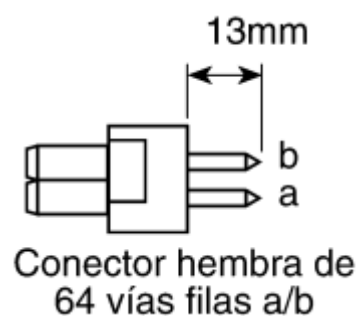


**Figura 4.6:** Esquema de la conexión del controlador

Los números que se muestran son el número del pin de la placa controladora.

Se ha incluido un conector a estos pines para poder realizar fácilmente las conexiones eléctricas, siendo un conector estándar de 64 vías DIN 41612. Este conector tiene la referencia 8609.264.61.14.7x5.000E2 de FCI CONNECTORS.

Este es esquema del conector de la placa controladora:



**Figura 4.7:** Perfil del conector de la placa de activación

Las características técnicas del conector son:

| Conector | Macho | Hembra |
|----------|-------|--------|
|----------|-------|--------|



| Material de contacto                    | Latón   | Bronce fosforoso |
|---|---|------------------|
| Recubrimiento del contacto              | Oro sobre níquel                                  |                  |
| Aislante                                | Poliéster UL94V-0                                 |                  |
| Resistencia de aislamiento              | $\geq 10^{12} \Omega$                             |                  |
| Resistencia de contacto                 | $\leq 15 \text{ m}\Omega$                         |                  |
| Temperatura de funcionamiento           | de $-65^{\circ}\text{C}$ a $+125^{\circ}\text{C}$ |                  |
| Tensión de prueba entre contactos       | 1kV rms   |                  |
| Tensión de prueba de contacto a tierra  | 1,5kV rms   |                  |
| Corriente nominal                       | 2 A máximo  |                  |
| Fuerza de inserción/ extracción por vía | 95g   |                  |

**Tabla 4.2:** Características técnicas del conector

Las funciones de los pines del controlador son:

| <b>Conector Din 41612 de 64 vías, funciones de los pines</b> |                           |    |    |                           |
|--|---------------------------|----|----|---------------------------|
|  | Alimentación 5V           | 1  | 1  | alimentación 5V           |
| Excitador LCD  | Sin conexión              | 2  | 2  | sin conexión              |
|  | Sin conexión              | 3  | 3  | sin conexión              |
|  | LCD bit 4                 | 4  | 4  | LCE bit 5                 |
|  | LCD bit 6                 | 5  | 5  | LCE bit 7                 |
|  | Selección registro LCD    | 6  | 6  | Leer/escribir LCD         |
|  | Habilitar LCD             | 7  | 7  | Sin conexión              |
| Entradas de Codificador manual                               | Fase A para eje Y         | 8  | 8  | Fase B para eje Y         |
|  | Fase A para eje X         | 9  | 9  | Fase B para eje X         |
| Entradas de limite   | Límite positivo eje Y (-) | 10 | 10 | Límite positivo eje Y (+) |
|  | Límite negativo eje Y (-) | 11 | 11 | Límite negativo eje Y (+) |
|  | Límite positivo eje X (-) | 12 | 12 | Límite positivo eje X (+) |
|  | Límite negativo eje X (-) | 13 | 13 | Límite negativo eje X (+) |
| Salida de accionamiento del motor paso a paso                | Sentido eje X             | 14 | 14 | Sentido eje X             |
|  | Impulso de reloj eje Y    | 15 | 15 | Impulso de reloj eje Y    |
| 8 salidas  | Salida cero (-)           | 16 | 16 | Salida cero (+)           |
|  | Salida 1 (-)              | 17 | 17 | Salida 1 (+)              |
|  | Salida 2 (-)              | 18 | 18 | Salida 2 (+)              |
|  | Salida 3 (-)              | 19 | 19 | Salida 3 (+)              |
|  | Salida 4 (-)              | 20 | 20 | Salida 4 (+)              |
|  | Salida 5 (-)              | 21 | 21 | Salida 5 (+)              |
|  | Salida 6 (-)              | 22 | 22 | Salida 6 (+)              |
|  | Salida 7 (-)              | 23 | 23 | Salida 7 (+)              |
| 8 entradas   | Entrada cero (-)          | 24 | 24 | Entrada cero (+)          |
|  | Entrada 1 (-)             | 25 | 25 | Entrada 2 (+)             |
|  | Entrada 2 (-)             | 26 | 26 | Entrada 2 (+)             |
|  | Entrada 3 (-)             | 27 | 27 | Entrada 3 (+)             |
|  | Entrada 4 (-)             | 28 | 28 | Entrada 4 (+)             |
|  | Entrada 5 (-)             | 29 | 29 | Entrada 5 (+)             |
|  | Entrada 6 (-)             | 30 | 30 | Entrada 6 (+)             |
|  | Entrada 7 (-)             | 31 | 31 | Entrada 7 (+)             |
|  | Alimentación 0V           | 32 | 32 | Alimentación 0V           |

**Figura 4.8:** Función de los pines del controlador

La conexión del controlador con el activador es a través de los pines:



14b, que se conecta al pin 23 del activador.

15b, que se conecta al pin 24 del activador.

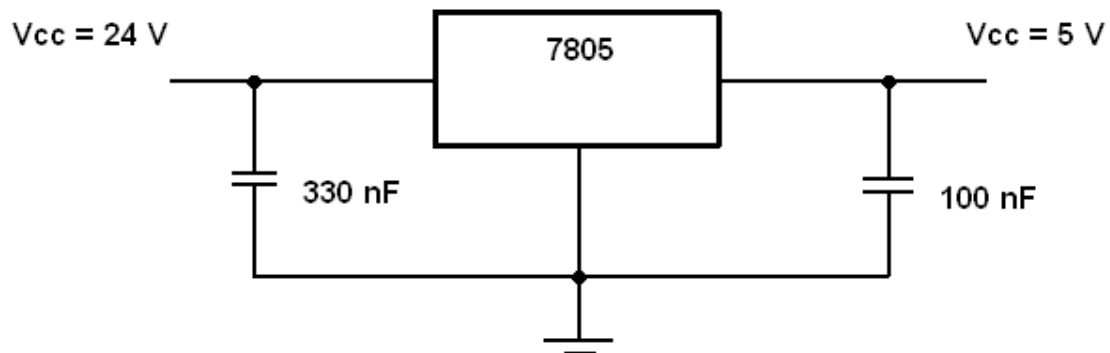
Al controlador se le programa la velocidad, posición,... del motor y el lo transforma en pulsos de reloj y a una corriente continua para definirle al activador todos los parámetros anteriores; este a su vez lo transforma en impulsos eléctricos que hace que se activen las bobinas del motor de forma adecuada.

La conexión del controlador hacia la fuente de alimentación se realiza mediante los pines:

1b, que se conectado a la borna positiva.

32b, que se conecta a masa.

Hay que incluir un sistema electrónico, ya que se necesita una fuente de 5 V y la usada es de 24V. Para ello se incluye:

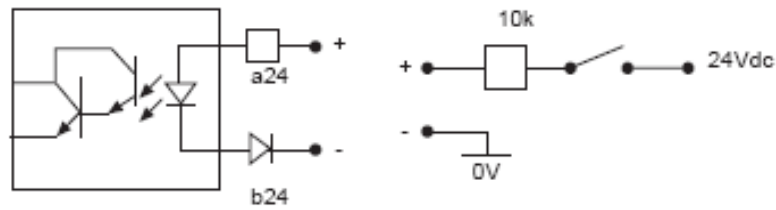


**Figura 4.9:** Electrónica para la alimentación del controlador

Este sistema está compuesto por un integrado 7805 (es un regulador de corriente positivo) y por dos condensadores de  $0,33\mu\text{F}$  y  $0,1\mu\text{F}$  que permiten que la intensidad de corriente pase de 24 a 5 voltios.

Por otra parte, se necesitan usar dos entradas y una salida. Las entradas son para los detectores de final de carrera, estos van a emitir una señal de aproximadamente 24 V (próxima a la de su alimentación), sólo cuando detecten el émbolo y la placa controladora debe de cambiar de voltaje la salida de dirección de giro (14b). La salida es para la electroválvula, esta necesita recibir una corriente de entre 12 y 24 V de corriente continua para cambiar de posición sus vías, al cambiar de giro el motor.

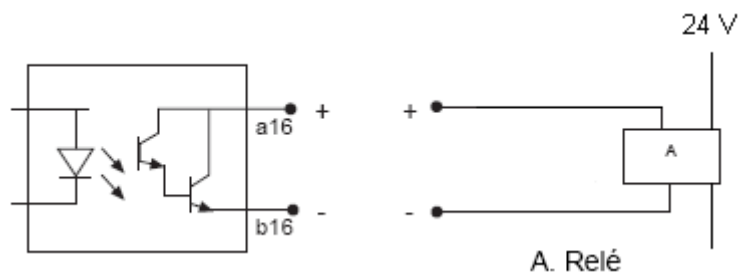
El controlador es capaz de recibir una señal de 24V, poniendo el siguiente sistema:

**Figura 4.10:** Electrónica para las entradas

La parte izquierda se realiza mediante el integrado optoacopladores de cuatro darlington en encapsulado plástico DIL de 16 pines con la referencia PS 2502-4 de NEC, incluyéndolo en la placa controladora. Y en la parte derecha, todo ello externo a la placa, se incluye una resistencia de 10 kΩ para limitar la corriente a los valores admitidos por el optoacoplador. La resistencia tiene una potencia de:

$$W = V \cdot A = 24 \cdot 0,2 = 4,8 \text{ w}$$

El controlador es capaz de emitir una señal de corriente continua. Para ello hay que añadir el sistema:

**Figura 4.11:** Electrónica para la salida

La parte izquierda se realizaría mediante el integrado optoacopladores de cuatro darlington anterior, incluyéndolo en la placa controladora. Y en la parte derecha se incluye un relé que activa la electroválvula. Cuando el controlador emite una señal, el relé, permite el paso de la tensión necesaria para que la electroválvula se active.

Quedando las conexiones de las salidas y entradas:

20b, que se conecta al relé de la electroválvula.

24b, que se conecta al cable negro del sensor derecho.

27b, que se conecta al cable negro del sensor izquierdo.

Para la conexión al PC viene incluido un zócalo RS232 en la placa. Las conexiones entre los pines de la entrada del ordenador y entre la del controlador son:

| Función del PC   |                | Función de la tarjeta de control                                  |
|--|----------------|---|
| (DI) entrada de datos  | 2 — 3          | (DO) salida de datos  |
| (DO) salida de datos   | 3 — 2          | (DI) datos  |
| (DTR) terminal de datos dispuesto                              | 4 — 6<br>1 — 1 | (DSR) conjunto de datos dispuesto<br>(DCD) detección de portadora |
| (SG) tierra de la señal  | 5 — 5          | (SG) tierra de la señal   |
| (DSR) conjunto de datos dispuesto<br>(DCD) portadora detectada | 6 — 4<br>1 — 1 | (DTR) terminal de datos dispuesto                                 |
| (RTS) solicitud de transmitir                                  | 7 — 8          | (CTS) listo para transmitir                                       |
| (CTS) listo para transmitir                                    | 8 — 7          | (RTS) solicitud de transmitir                                     |

**Figura 4.12:** Conexiones entre PC y controlador

Para realizar las conexiones de estos pines se ha usado un adaptador con referencia GA0909MFLGK de MH CONNECTORS, el cual permite realizar esto de forma directa. Se ha usado también el cable con referencia 215-410 de RS, con zócalos RS232 enchufando al adaptador y conectando el PC y la placa controladora.

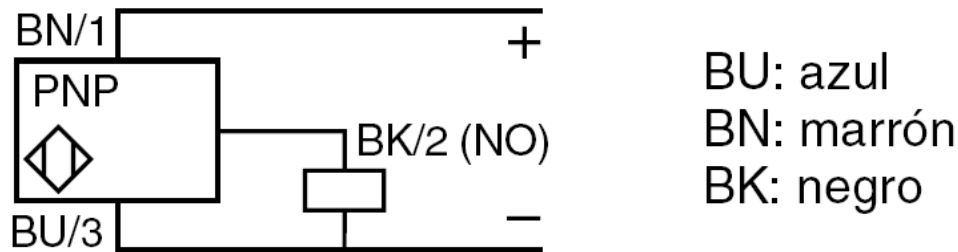
El cable está terminado en cada extremo con un conector de 9 pines (hembra) moldeado y con tornillos de fijación. Este cable tiene unas características técnicas:

|                           |                                     |
|---------------------------|-------------------------------------|
| Conductores del cable     | Hilo de cobre estañado de 24 awg    |
| Apantallamiento           | Lámina de aluminio Mylar 100%       |
| Resistencia               | 0,085Ω/m máx.                       |
| Corriente nominal         | 2A máx.                             |
| Tensión de funcionamiento | 300V máx.                           |
| Resistencia de contacto   | 15mΩ máx.                           |
| Vida útil                 | 500 ciclos de conexión/ desconexión |
| Configuración de cableado | pin a pin (secuencialmente)         |
|                           | pantalla-pantalla                   |

**Tabla 4.3:** Características técnicas del cable

## 4.4. Detectores de fin de carrera

El esquema de las conexiones de los detectores es:



**Figura 4.13:** Esquema de la conexión de los detectores

Estos cables van conectados:

BN, se conecta a la terminal positiva de la fuente.

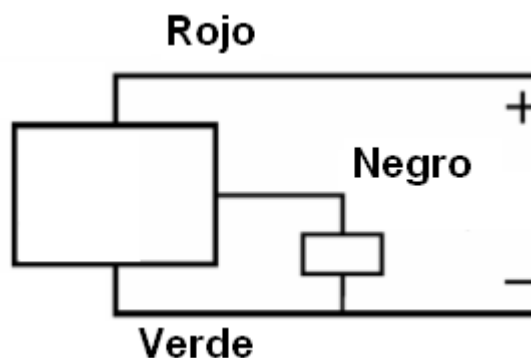
BU, se conecta a la terminal negativa de la fuente.

BK, se conecta a la resistencia de 10 kΩ.

El cable BK es el que emite la señal, y va conectado a una resistencia y de aquí va a la placa controladora.

## 4.5. Electroválvula

El esquema de las conexiones de la electroválvula es:



**Figura 4.14:** Esquema de la conexión de la electroválvula

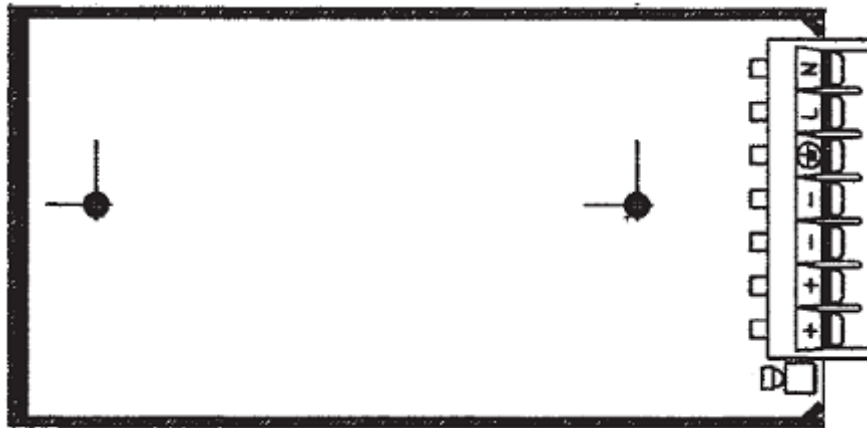
Rojo, se conecta al relé.

Verde, se conecta a tierra.

Negro, se conecta a la terminal negativa de la fuente.

## 4.6. Fuente de alimentación

La fuente de alimentación tiene lo siguientes conectores:



*Figura 4.15: Fuente de alimentación*

Siendo los conectores de arriba L, N y tierra, los que van directamente a la red, a 220 V de corriente alterna. Los otros cuatro conectores son dos para el potencial de corriente positivo y dos para usarlos como masa (tierra) para las conexiones a la fuente.

Las conexiones de la fuente son hacia la placa de activación con el motor, al controlador, a los sensores y a la electroválvula. Hacia la placa de activación se realiza la conexión del conector positivo (24 V de corriente continua) de la fuente al pin 28 de la placa (con la posterior conexión alimentación al motor con la misma conexión), y con la terminal negativa (0 V) se conecta al pin 30.

La conexión al controlador es mediante el integrado 7805 al requerir una corriente de 5 V el controlador. Por lo que la terminal positiva de la fuente se conecta a la entrada del integrado 7805 (la salida de este al pin 1b de controlador) y la terminal negativa se conecta a la salida del integrado a tierra y al conector el pin 32b.

La conexión hacia los sensores es mediante el cable marrón del sensor hacia la terminal positiva y el cable azul a la terminal negativa. La electroválvula se conecta mediante el cable rojo a la terminal positiva y el cable verde a la terminal negativa.

## 5. ESTUDIO TEÓRICO DEL PERFIL DE VELOCIDADES EN LA SECCIÓN DE ENSAYOS

### - Ecuaciones con condiciones de contorno

1º Aproximación de flujo sinusoidal:

$$Q = Q_0 \cdot \cos \omega t$$

2º Aproximación de flujo unidimensional:

$$u_r = u_\theta = 0 \quad u_z = u_z(z, r, \theta, t)$$

Ecuaciones de continuidad:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(ru_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$

Se reducen los términos de la ecuación de continuidad, en los que esté implicada la velocidad en  $r$  o en  $\theta$ , debido a la aproximación de flujo unidimensional. Quedando que:

$$\frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad u_z = u_z(r, \theta, t)$$

3º Aproximación de simetría:

$$u_z = u_z(r, t)$$

Aplicando la **ecuación de cantidad de movimiento** en coordenadas cilíndricas:

$$\rho \left( \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} \right] + \rho f_{mr}$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_\theta}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_\theta}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{v_r v_\theta}{r} + v_z \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \right) = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \mu \left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_\theta) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right] + \rho f_{m\theta}$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] + \rho f_{mz}$$

Se reducen los términos de la ecuación de cantidad de movimiento, para las tres coordenadas, en los que esté implicada la velocidad en  $r$  o en  $\theta$ , debido a la aproximación de flujo unidimensional. Obteniéndose:

$$r: \quad 0 = \frac{\partial p}{\partial r} + p f m_r = \frac{\partial}{\partial r} (p + \rho V) = 0$$

$$\theta: \quad 0 = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial p}{\partial \theta} + p f m_\theta = -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} (p + \rho V) = 0$$

$$z: \quad \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \rho f m_z$$

Reduciendo se el término  $\rho u \frac{\partial u}{\partial z}$ , al obtener con la ecuación de continuidad que:

$$\frac{\partial u_z}{\partial z} = 0$$

**P:** presión reducida  $P = p + \rho V = P_\rho(r, \theta, z, t)$

De la ecuación de cantidad de movimiento para  $r$  se deduce que  $P = P(\theta, z, t)$  pero  $P$  no depende de  $r$ . De la ecuación de cantidad de movimiento para  $\theta$  se deduce que  $P = P(z, t)$  pero  $P$  no depende de  $t$ .

Quedando la ecuación de cantidad de movimiento para  $z$ :

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -P_\rho + \mu \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u}{\partial r} \right)$$

Para  $P_\rho = \frac{\partial P}{\partial z} = P_\rho(t)$

Las **condiciones de contorno** son:

$u(r=a)=0$  Condición de no deslizamiento

$u'(r=0)=0$  Condición de simetría

## - **Adimensionalización de las ecuaciones**

Parámetros característicos:

- Tiempo característico:  $t_c = \omega^{-1}$

- Velocidad característico  $u_0 = \frac{Q_0}{2\pi a^2}$
- La longitud característica radial:  $a$
- No tiene longitud característica longitudinal

Llamando por tanto

- $\hat{t} = t \cdot \omega$
- $\hat{u} = \frac{u}{u_0}$
- $\eta = \frac{r}{a}$

Ecuación adimensionalizada:

$$\frac{\partial \hat{u}}{\partial \hat{t}} = -\frac{\pi a^2}{Q_0 \rho} P_\rho(\hat{t}) + \frac{\nu}{a^2 \omega} \frac{1}{\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \eta \frac{\partial \hat{u}}{\partial \eta} \right)$$

Condiciones de contorno:

$$\hat{u}(\eta = 0) = 0$$

$$\hat{u}(\eta = 1) = 0$$

$$St = \frac{\nu}{a^2 \omega} \quad (\text{Número de Stokes})$$

## - Solución de la ecuación

El número adimensional de Stokes mide la relación entre el tiempo viscosa (o el tiempo en el que el fluido interior se da cuenta de lo que pasa en las paredes) y el tiempo característico del problema ( $\omega^{-1}$ ). Calculando su valor en el flujo pulsante del corazón para determinar si se puede despreciar el término donde está implicado él.

$$\nu: \text{viscosidad cinemática del agua} \quad \nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$T: \text{periodo de oscilación} \quad T = 0,8 \text{ s}$$

$$\omega: \text{frecuencia de oscilación} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} = 7,85 \text{ Hz}$$

$$a: \text{radio de la sección} \quad a = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$



$$St = \frac{\nu}{a^2 \omega} = \frac{10^{-6}}{(5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 7,85} = 5,1 \cdot 10^{-3}$$

En el caso de flujo pulsante de corazón  $St \approx 5 \cdot 10^{-3}$ , siendo despreciable el término  $St \frac{1}{\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \eta \frac{\partial \hat{u}}{\partial \eta} \right)$ . Reduciéndose la ecuación de cantidad de movimiento a:

$$\frac{\partial \hat{u}}{\partial t} = - \frac{\pi a^2}{Q_0 \rho} P_\rho(t)$$

$$\hat{u}(\eta = 0) = 0$$

$$\hat{u}(\eta = 1) = 0$$

Como se trata de un flujo pulsante la presión tendrá esta forma:

$$\frac{\pi a^2}{Q_0 \rho} P_\rho(t) = \Re(A \cdot e^{i\omega t}) = \Re(A \cdot \cos \omega t + iA \cdot \sin \omega t) = \Re(A \cdot e^{it})$$

Llamando  $\tilde{u}$  a la variable compleja que cumple:

$$\Re(\tilde{u}) = \hat{u}$$

Quedando la ecuación de cantidad de movimiento reducida como:

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} = A \cdot e^{it}$$

$$\tilde{u} = \int A e^{it} dt = A e^{it}$$

$$u = \Re(\tilde{u}) = A \cos \omega t$$

Para determinar la constante A, se usa la ecuación de continuidad:

$$\int u 2\pi r dr = Q$$

$$Q_0 \cos \omega t = \int_0^a A \cos \omega t \cdot 2\pi r dr$$

$$Q_0 = \frac{2\pi a^2}{2} A \quad A = \frac{Q_0}{\pi a^2}$$

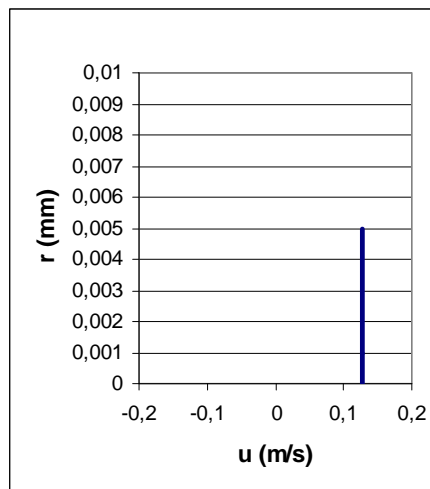
$$u(t) = \frac{Q_0}{\pi a^2} \cos \omega t$$

Es decir, la velocidad depende sólo de la variable  $t$ , y no de  $r$ , salvo cerca de la pared donde la aproximación de despreciar los términos viscosos no es válida. La ecuación obtenida es completamente válida para los valores centrales del perfil de velocidades. Para valores próximos a la pared (entorno a la capa límite), hay que tener en cuenta los términos viscosos, y no cumple la ecuación las condiciones de contorno sobre ella, ya que  $\hat{u} (\eta = 1) \neq 0$ .

Los resultados obtenidos se pueden apreciar en las siguientes gráficas. Tomándose los valores del flujo cardiaco, para un caudal de:

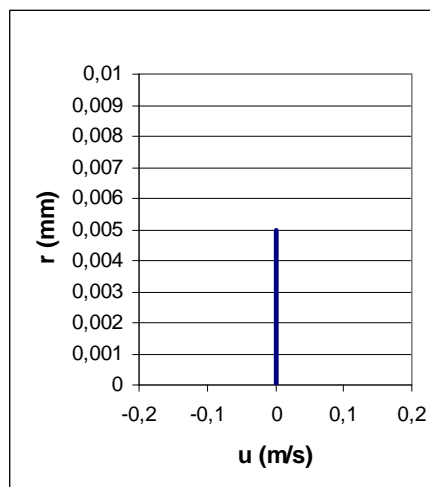
$$Q_0 = 10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

Para un tiempo de  $t = 0$



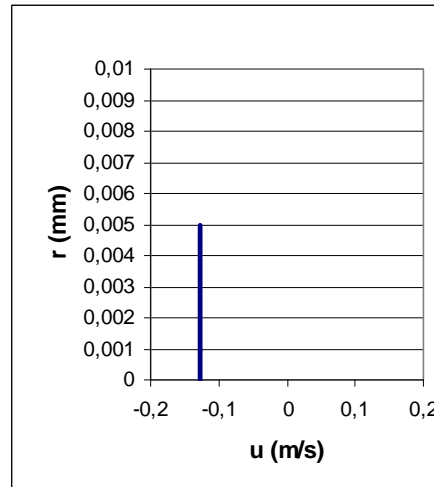
**Figura 5.1:** Perfil de velocidad para un tiempo  $t = 0$

Para un tiempo de  $t = \frac{\pi/2}{\omega}$



**Figura 5.2:** Perfil de velocidad para un tiempo  $t = \frac{\pi/2}{\omega}$

Para un tiempo de  $t = \frac{\pi}{\omega}$



**Figura 5.3:** Perfil de velocidad para un tiempo  $t = \frac{\pi}{\omega}$

Este estudio teórico del perfil de velocidades sirve para comparar los resultados que se obtengan en los estudios prácticos al medir los perfiles de velocidades con una arteria con aneurisma, con estos valores teóricos, para valores que no sean cercanos a la pared.

También estos resultados se pueden comparar con los resultados obtenidos del Fluent, a modo de comprobación.

## 6. PROGRAMACIÓN

La función del programa es dar las instrucciones detalladas del comportamiento del sistema. La programación se realiza en código ASCII mediante un editor de texto, con unos comandos específicos para el software de la placa controladora.

El software que corresponde a la placa es el S117 de CORTEX CONTROLLERS.

Este software es un emulador de terminal, un programa informático que simula el funcionamiento de un terminal de un ordenador central a través de una red de telecomunicaciones entre dicho ordenador central y el ordenador que ejecuta el emulador de terminal. Sirve para probar y manejar las funciones básicas de la placa desde un entorno gráfico. Para aplicar la placa controladora, hay que programarla con los comandos de control de movimiento que se describen en la hoja técnica de la placa.

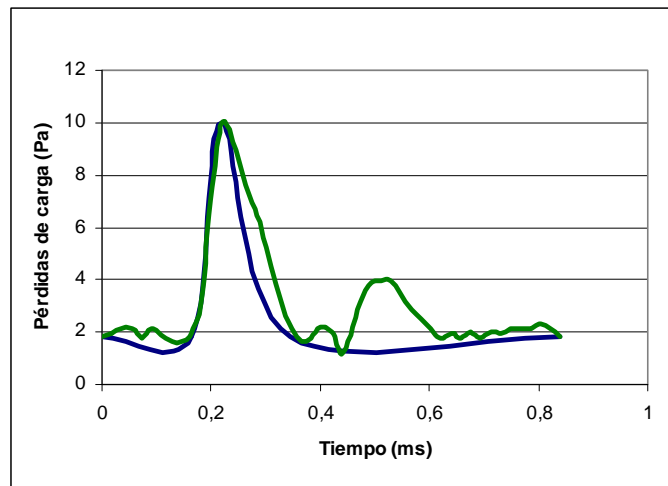
El programa que se ha realizado con los comandos de control, se envía a la placa a través de un ordenador, usando un terminal de Windows que le permite enviar datos por el puerto serie.

Algunos de los comandos de control más genéricos son:

|            |  |
|------------|--|
| arc()      | Dibuja un arco.                                  |
| cmove()    | Moverse a velocidad constante.                   |
| cmovel()   | Moverse a los límites en de velocidad constante. |
| cvel()     | Velocidad constante determinada.                 |
| halt()     | Para el movimiento suavemente.                   |
| in()       | Lee las entradas.                                |
| limit()    | Lee el estado del interruptor de límite.         |
| manual()   | Permite el movimiento manual.                    |
| memfree()  | Indica la cantidad de memoria inusitada.         |
| move()     | Moverse a una posición (acelerada).              |
| movel()    | Moverse a los límites (con la aceleración).      |
| moving()   | Comprueba el estado del movimiento.              |
| out()      | Fija las salidas.                                |
| param()    | Parámetros del motor.                            |
| prescale() | Aumenta la gama de velocidades.                  |
| stop()     | Para el movimiento bruscamente.                  |
| time()     | Tiempo que mantiene el programa.                 |
| where()    | Repite la posición del motor.                    |
| wait()     | Espera por un período de tiempo.                 |

**Tabla 6.1:** Comandos de control

Se han programado las instrucciones para simular el pulso en una arteria carótida. Se ha simplificado el programa para cinco puntos características del pulso arterial. Siendo la curva que se muestra:



**Figura 6.1:** Simplificación del pulso

Ver el programa para el pulso real en Anexo Software. Las instrucciones simplificadas son:

New

```

Proc ciclo_izq{                                     //subprograma para que el motor gire a izquierdas

    prescale(100)                                   //multiplica por 100 los demás parámetros
    PARAM(0,5544,5544,0)                           //definición de los parámetros (motor, velocidad
                                                    //mínima, velocidad máxima, aceleración)
    MOVE(915)                                       //definir el numero de pasos se mueve el motor
    PARAM(0,5544,30800,459190)
    MOVE(999)
    PARAM(0,30800,55444,-202040)
    MOVE(2271)
    PARAM(0,5544,5544,0)
    MOVE(2744)
}

Proc ciclo_der{                                     //subprograma para que el motor gire a derechas
    prescale(100)
    PARAM(0,5544,5544,0)
    MOVE(-915)
    PARAM(0,5544,30800,459190)
    MOVE(-999)
    PARAM(0,30800,55444,-202040)
    MOVE(-2271)
    PARAM(0,5544,5544,0)
    MOVE(-2744)
}

```



```

Proc Programa{                                     //programa principal

    n=1                                             //variable
    cont1=0                                         //variable
    cont2=0                                         //variable
    cont3=0                                         //variable

    while (in(1,0)){                               //bucle que se realiza mientras input#1 está
                                                    //inactivo, entrada del sensor izquierdo
        out(1,0)                                   //salida a la electroválvula inactiva
        prescale(100)
        cvel (10000)                               // velocidad constante
    }

    while((cont3LT400)OR(in(2,0))){                //bucle mientras input#2 es inactivo, o
                                                    //se hacen menos de 400 ciclos
        out(1,1)                                   //salida a la electroválvula activa
        ciclo_der                                  //llamada al programa ciclo_der
        cont3++                                     //incremento en 1 del contador
    }

    If (n==1) {                                     //bucle que se realiza si n=1
        while((cont1LT350)OR(in(1,0))){
            out(1,0)
            ciclo_izq                               //llamada al programa ciclo_izq
            cont1++
        }
        n==0
    }

    If (n==0) {
        while((cont2LT350)OR(in(2,0))){
            out(1,1)
            ciclo_der
            cont2++
        }
        n==1
    }
}

```



## **7. CONCLUSIONES**

### **7.1. Funcionamiento del equipo**

Una vez se ha realizado el diseño, se ha ido fabricando y obteniendo los distintos componentes, se ha desarrollando el montaje y comprobado su acoplamiento.

Mientras que se han incluido piezas al conjunto se han realizado ciertos ajustes, e incluso cambios en el diseño original. También se han ido incluyendo piezas nuevas en el proceso de montaje, como por ejemplo, piezas para dar una mayor estabilidad y sujeción.

Además se han ido realizando distintas pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de las piezas que se iban desarrollando. Estas pruebas han sido:

#### **PRUEBA 1. Ajuste entre piezas**

Se ha realizado tras la fabricación de las piezas, la comprobación de las tolerancias de las piezas que van juntas, para ver si el ajuste es adecuado. Es de gran importancia en las piezas de las tapas, donde tiene que haber la máxima precisión entre las distintas piezas, para que no haya fugas de líquido de trabajo.

#### **PRUEBA 2. Deslizamiento entre piezas**

Otra prueba ha sido la comprobación del deslizamiento entre dos piezas. Estas se han realizado entre el émbolo y el cilindro, las barras que sirven de guías y el émbolo, el eje y sus apoyos.

#### **PRUEBA 3. Deslizamiento del conjunto**

Tras la confirmación del correcto deslizamiento entre cada pieza, se examinó la facilidad de movimiento del conjunto del émbolo, el cilindro y el tornillo sin fin, girándolo a éste de forma manualmente, al tener todo el conjunto montado. Comprobándose su correcto movimiento.

#### **PRUEBA 4. Funcionamiento con el fluido**

Esta prueba consiste en el llenado de parte del cilindro y comprobar que se realiza bien el empuje de agua por el émbolo y que no hay fugas en ningún componente del émbolo, ni de ninguna pieza de las tapas.

**PRUEBA 5. Funcionamiento del motor**

Esta consiste en probar las conexiones eléctricas, sin realizar el montaje del motor al tornillo. Para ello se realizan todas las conexiones y se activa el motor desde un PC, dándole una orden simple de movimiento continuo.

**PRUEBA 6. Funcionamiento de los sensores**

También para verificar las conexiones eléctricas, sin realizar el montaje del motor, se hace que los sensores detecten un objeto y se comprueba que el motor cambia de sentido de giro.

**PRUEBA 7. Acoplamiento del motor al conjunto**

Se comprueba el funcionamiento de todo el proyecto montado, poniendo en funcionamiento el motor, pero dándole una orden simple, no enviándole el programa, para ver que se mueve perfectamente el émbolo.



## **7.2. Trabajos futuros**

Como trabajo futuro por realizar queda la comprobación de la correcta reacción del motor a las órdenes dadas por el software. Para ello se puede utilizar una cámara de alta velocidad para el seguimiento del émbolo, comprobando si describe la gráfica del pulso cardiaco.

Los estudios que se van a realizar con la instalación consistirán en colocar una sección de ensayos entre el tubo que sale de la electroválvula y el que llega al depósito y provocar un flujo pulsátil que simula el producido por el corazón en diferentes regiones del sistema arterial o venoso. El flujo se puede visualizar mediante el sembrado del fluido usado con partículas que reflejan la luz o con tintes que se excitan con una luz láser y reemiten luz a una cierta longitud de onda. También se realizarán medidas rigurosas de velocidad mediante el uso de las técnicas PIV o LDV, basadas en el análisis de la dispersión de luz láser por las partículas con las que se siembra el fluido de trabajo. La sección de ensayos puede reproducir cualquier geometría de un vaso sanguíneo sano o con una enfermedad. Pueden fabricarse modelos con geometría genérica u obtenerse datos de un ensayo clínico y realizar modelos que sean específicos para un paciente concreto que presenta una patología concreta que se desea estudiar.

Los estudios se van a centrar principalmente en arterias con aneurisma. Los ensayos en aneurismas pueden ser muy variados, dependiendo del tipo de aneurisma que se quiera estudiar. También los ensayos dependen de la arteria a estudiar, ya que tiene una determinada geometría, un determinado tipo de pulso, y una predilección por el tipo de aneurisma a contraer.

Estos estudios se van a concentrar en el aneurisma cerebral, siendo con el aneurisma aórtico abdominal, los que mayor importancia tienen. El de mayor interés es el aneurisma cerebral sacular, produciéndose la rotura y hemorragia con gran frecuencia.

También se pueden estudiar otras enfermedades como la estenosis, que es un estrechamiento u obstrucción de una arteria, aunque este estudio presenta una mayor complejidad geométrica que el de los aneurismas.

Los ensayos reales in vitro nos permiten estudiar el flujo sanguíneo en el entorno controlado del laboratorio, sin las complicaciones que conllevan los estudios in vivo en pacientes. Al mismo tiempo representan con gran fiabilidad la física del flujo pulsátil y, hasta cierto punto la geometría que se desea estudiar. Las simulaciones numéricas pueden complementar a los ensayos reales, permitiendo la realización de ensayos paramétricos rápidos sin la necesidad de fabricar un gran número de secciones de ensayos, con el coste económico y en horas de trabajo asociadas. Sin embargo, las simulaciones numéricas de flujos pulsátiles con geometrías complicadas presentan grandes desafíos en el uso de métodos numéricos avanzados y en la gestión de simulaciones paralelas masivas. Por ello, la validación de cualquier simulación numérica mediante la comparación con experimentos es un paso importante en el desarrollo de cualquier estudio y debe realizarse antes de poder sacar conclusiones sobre los resultados de las simulaciones.



El fin de estos estudios es la investigación de estas enfermedades, para entenderlas mejor, y para poder detectarlas antes que se desarrollen y encontrar tratamientos más efectivos.

## 8. PRESUPUESTOS

### 8.1. Componentes electrónicos y eléctricos

Para los costes de los componentes eléctricos y electrónicos se tiene en cuenta los costes de adquisición de estos productos.

Los precios de los distintos componentes son:

| Unidades               | Descripción                        | Precio unitario | Precio     |
|------------------------|------------------------------------|-----------------|------------|
| 1                      | Conector de la placa de control    | 4,44 €          | 4,44 €     |
| 1                      | Placa de control                   | 542,00 €        | 542,00 €   |
| 1                      | Software de control                | 95,56 €         | 95,56 €    |
| 1                      | Adaptador RS232                    | 3,39 €          | 3,39 €     |
| 1                      | Cable RS232                        | 3,27 €          | 3,27 €     |
| 1                      | Integrado 7805                     | 0,44 €          | 0,44 €     |
| 1                      | Condensador 0,33 $\mu$ F           | 0,30 €          | 0,30 €     |
| 1                      | Condensador 0,1 $\mu$ F            | 0,30 €          | 0,30 €     |
| 2                      | RESISTENCIA 10 k $\Omega$          | 0,03 €          | 0,03 €     |
| 2                      | RESISTENCIA 10 $\Omega$            | 4,49 €          | 8,98 €     |
| 1                      | Placa de activación                | 41,96 €         | 41,96 €    |
| 1                      | Conector de la placa de activación | 3,23 €          | 3,23 €     |
| 1                      | Motor paso a paso                  | 84,18 €         | 84,18 €    |
| 1                      | Fuente de alimentación             | 80,97 €         | 80,97 €    |
| 2                      | Detector de posición inductivo     | 53,62 €         | 107,24 €   |
| 1                      | Ordenador                          | 699,00 €        | 699,00 €   |
| 1                      | Electroválvula                     | 452,12 €        | 452,12 €   |
| <b>Precio total</b>    |                                    |                 | 2.127,41 € |
| <b>I.V.A. (16%)</b>    |                                    |                 | 340,39 €   |
| <b>Gastos de envío</b> |                                    |                 | 30 €       |
| <b>Precio final</b>    |                                    |                 | 2.497,80 € |

**Tabla 8.1:** Costes de los componentes electrónicos y eléctricos

## 8.2. Componentes mecánicos

Para los costes de los componentes mecánicos se tiene en cuenta los costes de adquisición de estos productos.

Los precios de los distintos componentes son:

| Unidades               | Descripción                              | Precio unitario | Precio  |
|------------------------|--|-----------------|---------|
| 1                      | Rodamiento                               | 3,56 €          | 3,56 €  |
| 1                      | Junta de acoplamiento (conector 6,35 mm) | 7,66 €          | 7,66 €  |
| 1                      | Junta de acoplamiento (conector 3/8 ")   | 7,66 €          | 7,66 €  |
| 1                      | Junta de acoplamiento (disco)            | 1,26 €          | 1,26 €  |
| 1                      | Depósito                                 | 13,10 €         | 13,10 € |
| 2                      | Conductos (en metros)                    | 3,63 € / metro  | 7,26 €  |
| 2                      | Racor                                    | 2,59 €          | 5,18 €  |
| 2                      | Purga                                    | 2,06 €          | 4,12 €  |
| 1                      | Tapón                                    | 0,36 €          | 0,36 €  |
| <b>Precio total</b>    |  |                 | 50,16 € |
| <b>I.V.A. (16%)</b>    |  |                 | 9,63 €  |
| <b>Gastos de envío</b> |  |                 | 10 €    |
| <b>Precio final</b>    |  |                 | 69,79 € |

**Tabla 8.2:** Costes de los componentes mecánicos

### 8.3. Componentes mecanizados

Para los costes de los componentes mecanizados se tiene en cuenta los costes por utillaje, por materia prima y por mano de obra. En la parte de los costes por utillaje se incluye el gasto por la máquina, por las herramientas y el energético.

Las piezas que se han mecanizado son: el cilindro, las tapas del cilindro, el émbolo, el tornillo sin fin, el soporte del conjunto cilindro y del motor, y el soporte general.

#### - CILINDRO

El coste de material se calcula aplicando la fórmula:

$$C_{\text{mat. prima}} = Vol \cdot \rho \cdot C_{\text{peso}}$$

$$Vol \text{ (volumen de la materia prima inicial)} = 2\pi \cdot 0,5^2 \cdot 3 = 4,71 \text{ dm}^3$$

$$\text{Densidad del metacrilato: } 1,19 \text{ kg / dm}^3$$

$$\text{Coste de metacrilato: } 0,21 \text{ € / kg}$$

$$C_{\text{mat. prima}} = Vol \cdot \rho \cdot C_{\text{peso}} = 2\pi \cdot 0,5^2 \cdot 3 \cdot 1,19 \cdot 0,21 = 1,18 \text{ € por pieza}$$

El coste de utillaje es de 3,50 € por cada hora

El coste de la mano de obra es de 18 € por cada hora

Se han empleado un total de 45 minutos para el mecanizado del cilindro

Los costes del cilindro son:

| Concepto              | Coste por hora | Total         |
|-----------------------|----------------|---------------|
| Coste de utillaje     | 3,50 €/h       | 2,62 €        |
| Coste de mano de obra | 18,00 €/h      | 13,5 €        |
| Coste material        |                | 1,18 €        |
| <b>Coste total</b>    |                | <b>17,3 €</b> |

**Tabla 8.3: Costes del cilindro**

#### - LAS TAPAS DEL CILINDRO

Las tapas del cilindro están compuestas de varias piezas de distintos materiales, estas piezas son las que están compuestas por PVC y las piezas de latón

- Para las piezas compuestas de PVC los costes son:

El coste de material es igual a  $C_{\text{mat. prima}} = Vol \cdot \rho \cdot C_{\text{peso}}$

$$Vol = (2\pi \cdot 1,5^2 \cdot 0,7) \cdot 2 = 19,79 \text{ dm}^3$$

Densidad del PVC: 1,38 kg / dm<sup>3</sup>

Coste de PVC: 0,15 € / kg

$$C_{\text{mat. prima}} = Vol \cdot \rho \cdot C_{\text{peso}} = (2\pi \cdot 1,5^2 \cdot 0,7) \cdot 2 \cdot 1,38 \cdot 0,15 = 4,10 \text{ € por pieza}$$

El coste de utillaje es de 4,50 € por cada hora

El coste de la mano de obra es de 18 € por cada hora

Se han empleado un total de 2,5 horas para el mecanizado del cilindro

Los costes de las piezas de PVC de las tapas son:

| Concepto              | Coste por hora | Total          |
|-----------------------|----------------|----------------|
| Coste de utillaje     | 4,50 €/h       | 11,25 €        |
| Coste de mano de obra | 18,00 €/h      | 45 €           |
| Coste material        |                | 4,10 €         |
| <b>Coste total</b>    |                | <b>60,35 €</b> |

**Tabla 8.4:** Costes de las piezas de PVC de las tapas

- Para las piezas compuestas de latón los costes son:

El coste de material es igual a  $C_{\text{mat. prima}} = Vol \cdot \rho \cdot C_{\text{peso}}$

$$Vol = 2\pi \cdot 0,5^2 \cdot 1,5 = 2,36 \text{ dm}^3$$

Densidad del latón: 8,4 kg / dm<sup>3</sup>

Coste de latón: 0,35 € / kg

$$C_{\text{mat. prima}} = Vol \cdot \rho \cdot C_{\text{peso}} = 2\pi \cdot 0,5^2 \cdot 1,5 \cdot 8,4 \cdot 0,35 = 6,94 \text{ € por pieza}$$

El coste de utillaje es de 6,50 € por cada hora

El coste de la mano de obra es de 18 € por cada hora

Se han empleado un total de 5,5 horas para el mecanizado del cilindro

Los costes de las piezas de latón de las tapas son:

| Concepto              | Coste por hora | Total           |
|-----------------------|----------------|-----------------|
| Coste de utillaje     | 6,50 €/h       | 35,75 €         |
| Coste de mano de obra | 18,00 €/h      | 99 €            |
| Coste material        |                | 6,94 €          |
| <b>Coste total</b>    |                | <b>141,69 €</b> |

**Tabla 8.5:** Costes de las piezas de latón de las tapas

### - ÉMBOLO

El émbolo está compuesto de varias piezas de distintos materiales, estas piezas están compuestas por nylon, latón y acero inoxidable.

- Para las piezas compuestas de nylon los costes son:

El coste de material es igual a  $C_{\text{mat. prima}} = Vol \cdot \rho \cdot C_{\text{peso}}$

$$Vol = 2\pi \cdot 0,5^2 \cdot 0,5 = 0,78 \text{ dm}^3$$

Densidad del nylon: 1,14 kg / dm<sup>3</sup>

Coste de nylon: 0,13 € / kg

$$C_{\text{mat. prima}} = Vol \cdot \rho \cdot C_{\text{peso}} = 2\pi \cdot 0,5^2 \cdot 0,5 \cdot 1,14 \cdot 0,13 = 0,12 \text{ € por pieza}$$

El coste de utillaje es de 2,00 € por cada hora

El coste de la mano de obra es de 18 € por cada hora

Se han empleado un total de 2 horas para el mecanizado del cilindro

Los costes de las piezas de nylon del émbolo son:

| Concepto              | Coste por hora | Total          |
|-----------------------|----------------|----------------|
| Coste de utillaje     | 2,00 €/h       | 4,00 €         |
| Coste de mano de obra | 18,00 €/h      | 38,00 €        |
| Coste material        |                | 0,78 €         |
| <b>Coste total</b>    |                | <b>42,78 €</b> |

**Tabla 8.6:** Costes de las piezas de nylon del émbolo

- Para las piezas compuestas de latón los costes son:

El coste de material es igual a  $C_{\text{mat. prima}} = Vol \cdot \rho \cdot C_{\text{peso}}$

$$Vol = 2\pi \cdot 0,5^2 \cdot 0,5 = 0,78 \text{ dm}^3$$

Densidad del latón: 8,4 kg / dm<sup>3</sup>

Coste de latón: 0,35 € / kg

$$C_{\text{mat. prima}} = Vol \cdot \rho \cdot C_{\text{peso}} = 2\pi \cdot 0,5^2 \cdot 0,5 \cdot 8,4 \cdot 0,35 = 2,31 \text{ € por pieza}$$

El coste de utillaje es de 6,50 € por cada hora

El coste de la mano de obra es de 18 € por cada hora

Se han empleado un total de 2 horas para el mecanizado del cilindro

Los costes de las piezas de latón del émbolo son:

| Concepto              | Coste por hora | Total          |
|-----------------------|----------------|----------------|
| Coste de utillaje     | 6,50 €/h       | 13,00 €        |
| Coste de mano de obra | 18,00 €/h      | 36,00 €        |
| Coste material        |                | 2,31 €         |
| <b>Coste total</b>    |                | <b>51,31 €</b> |

**Tabla 8.7:** Costes de las piezas de latón del émbolo

- Para las piezas compuestas de acero inoxidable los costes son:

El coste de material es igual a  $C_{\text{mat. prima}} = Vol \cdot \rho \cdot C_{\text{peso}}$

$$Vol = (2\pi \cdot 0,2^2 \cdot 0,1) \cdot 2 = 0,05 \text{ dm}^3$$

Densidad del acero inoxidable: 7,8 kg / dm<sup>3</sup>

Coste de acero inoxidable: 0,55 € / kg

$$C_{\text{mat. prima}} = Vol \cdot \rho \cdot C_{\text{peso}} = (2\pi \cdot 0,2^2 \cdot 0,1) \cdot 2 \cdot 7,8 \cdot 0,55 = 0,15 \text{ € por pieza}$$

El coste de utillaje es de 3,50 € por cada hora

El coste de la mano de obra es de 18 € por cada hora

Se han empleado un total de 45 minutos para el mecanizado del cilindro

Los costes de las piezas de acero inoxidable del émbolo son:



| Concepto              | Coste por hora | Total          |
|-----------------------|----------------|----------------|
| Coste de utillaje     | 3,50 €/h       | 2,62 €         |
| Coste de mano de obra | 18,00 €/h      | 13,5 €         |
| Coste material        |                | 0,15 €         |
| <b>Coste total</b>    |                | <b>16,27 €</b> |

**Tabla 8.8:** Costes de las piezas de acero inoxidable del émbolo**- TORNILLO SIN FIN**

El coste de material se calcula aplicando la fórmula:

$$C_{\text{mat. prima}} = Vol \cdot \rho \cdot C_{\text{peso}}$$

Vol (volumen de la materia prima inicial) =  $2\pi \cdot 0,25^2 \cdot 6 = 2,36 \text{ dm}^3$

Densidad del acero inoxidable:  $7,8 \text{ kg / dm}^3$

Coste de acero inoxidable:  $0,55 \text{ € / kg}$

$$C_{\text{mat. prima}} = Vol \cdot \rho \cdot C_{\text{peso}} = 2\pi \cdot 0,25^2 \cdot 6 \cdot 7,8 \cdot 0,55 = 10,11 \text{ € por pieza}$$

El coste de utillaje es de  $4,50 \text{ €}$  por cada hora

El coste de la mano de obra es de  $18 \text{ €}$  por cada hora

Se han empleado un total de 3 horas para el mecanizado del cilindro

Los costes del tornillo sin fin son:

| Concepto              | Coste por hora | Total          |
|-----------------------|----------------|----------------|
| Coste de utillaje     | 4,50 €/h       | 13,50 €        |
| Coste de mano de obra | 18,00 €/h      | 54,00 €        |
| Coste material        |                | 10,11 €        |
| <b>Coste total</b>    |                | <b>77,61 €</b> |

**Tabla 8.9:** Costes del tornillo sin fin**- SOPORTE DEL CONJUNTO CILINDRO Y DEL MOTOR**

El soporte está compuesto de varias piezas de distintos materiales, estas piezas están compuestas por aluminio y por acero inoxidable.

- Para las piezas compuestas de aluminio los costes son:

El coste de material es igual a  $C_{\text{mat. prima}} = Vol \cdot \rho \cdot C_{\text{peso}}$

$$Vol = (6 \cdot 2,5 \cdot 0,15)4 = 9 \text{ dm}^3$$

Densidad del aluminio:  $2,7 \text{ kg} / \text{dm}^3$

Coste de aluminio:  $0,62 \text{ €} / \text{kg}$

$$C_{\text{mat. prima}} = Vol \cdot \rho \cdot C_{\text{peso}} = 4 \cdot 4 \cdot 0,15 \cdot 2,7 \cdot 0,62 = 15,07 \text{ € por pieza}$$

El coste de utillaje es de  $7,00 \text{ €}$  por cada hora

El coste de la mano de obra es de  $18 \text{ €}$  por cada hora

Se han empleado un total de 10 horas para el mecanizado del cilindro

Los costes de las piezas de aluminio del soporte son:

| Concepto              | Coste por hora | Total           |
|-----------------------|----------------|-----------------|
| Coste de utillaje     | 7,00 €/h       | 70,00 €         |
| Coste de mano de obra | 18,00 €/h      | 180,00 €        |
| Coste material        |                | 15,07 €         |
| <b>Coste total</b>    |                | <b>265,07 €</b> |

**Tabla 8.10:** Costes de las piezas de aluminio del soporte

- Para las piezas compuestas de acero inoxidable los costes son:

El coste de material es igual a  $C_{\text{mat. prima}} = Vol \cdot \rho \cdot C_{\text{peso}}$

$$Vol = (2\pi \cdot 0,2^2 \cdot 6) \cdot 8 = 12,05 \text{ dm}^3$$

Densidad del acero inoxidable:  $7,8 \text{ kg} / \text{dm}^3$

Coste de acero inoxidable:  $0,55 \text{ €} / \text{kg}$

$$C_{\text{mat. prima}} = Vol \cdot \rho \cdot C_{\text{peso}} = (2\pi \cdot 0,2^2 \cdot 6) \cdot 8 \cdot 7,8 \cdot 0,55 = 51,75 \text{ € por pieza}$$

El coste de utillaje es de  $4,50 \text{ €}$  por cada hora

El coste de la mano de obra es de  $18 \text{ €}$  por cada hora

Se han empleado un total de 1 hora para el mecanizado del cilindro

Los costes de las piezas de acero inoxidable del soporte son:



| Concepto              | Coste por hora | Total          |
|-----------------------|----------------|----------------|
| Coste de utillaje     | 4,50 €/h       | 4,50 €         |
| Coste de mano de obra | 18,00 €/h      | 18,00 €        |
| Coste material        |                | 51,75 €        |
| <b>Coste total</b>    |                | <b>74,25 €</b> |

**Tabla 8.11:** Costes de las piezas de acero inoxidable del soporte**- SOPORTE GENERAL**

El soporte general está compuesto por perfiles prefabricados, de aluminio, que se obtienen en barras de 6 metros.

El coste de material es igual a  $C_{\text{mat. prima}} = \text{Longitud} \cdot C_{\text{perfil}}$

Longitud necesaria = 18 m

Coste del perfil aluminio: 15 €/m

$$C_{\text{mat. prima}} = \text{Longitud} \cdot C_{\text{perfil}} = 18 \cdot 15 = 270 \text{ € por pieza}$$

El coste de utillaje es de 1,00 € por cada hora

El coste de la mano de obra es de 18 € por cada hora

Se han empleado un total de 10 horas para el mecanizado del cilindro

Los costes del soporte general son:

| Concepto              | Coste por hora | Total           |
|-----------------------|----------------|-----------------|
| Coste de utillaje     | 1,00 €/h       | 10,00 €         |
| Coste de mano de obra | 18,00 €/h      | 180,00 €        |
| Coste material        |                | 270,00 €        |
| <b>Coste total</b>    |                | <b>460,00 €</b> |

**Tabla 8.12:** Costes del soporte general

Los costes de todos los componentes mecanizados son:

| Pieza                        | Coste total |
|------------------------------|-------------|
| Cilindro                     | 17,30 €     |
| Piezas de PVC de las tapas   | 60,35 €     |
| Piezas de latón de las tapas | 141,69 €    |
| Piezas de nylon del émbolo   | 42,78 €     |
| Piezas de latón del émbolo   | 51,31 €     |



|  |                 |
|--|-----------------|
| Piezas de acero inoxidable del émbolo  | 16,27 €         |
| Tornillo sin fin                       | 77,61 €         |
| Piezas de aluminio del soporte         | 265,07 €        |
| Piezas de acero inoxidable del soporte | 74,25 €         |
| Soporte general                        | 460,00 €        |
| <b>Coste final</b>                     | <b>987,29 €</b> |

***Tabla 8.13:** Costes de los componentes mecanizados*

## 8.4. Presupuesto total del proyecto

El presupuesto total del presente proyecto es:

| Componentes  | Coste             |
|--|-------------------|
| Componentes eléctrico y electrónicos                   | 2.497,80 €        |
| Componentes mecánicos                                  | 69,79 €           |
| Componentes mecanizados                                | 987,29 €          |
| Extras: tornillería, mano de obra en montaje,... (10%) | 355,49 €          |
| <b>Presupuesto total</b>                               | <b>3.910,37 €</b> |

*Tabla 8.14: Presupuesto global*

El importe total de este presupuesto es de tres mil novecientos diez euros con treinta y siete céntimos.



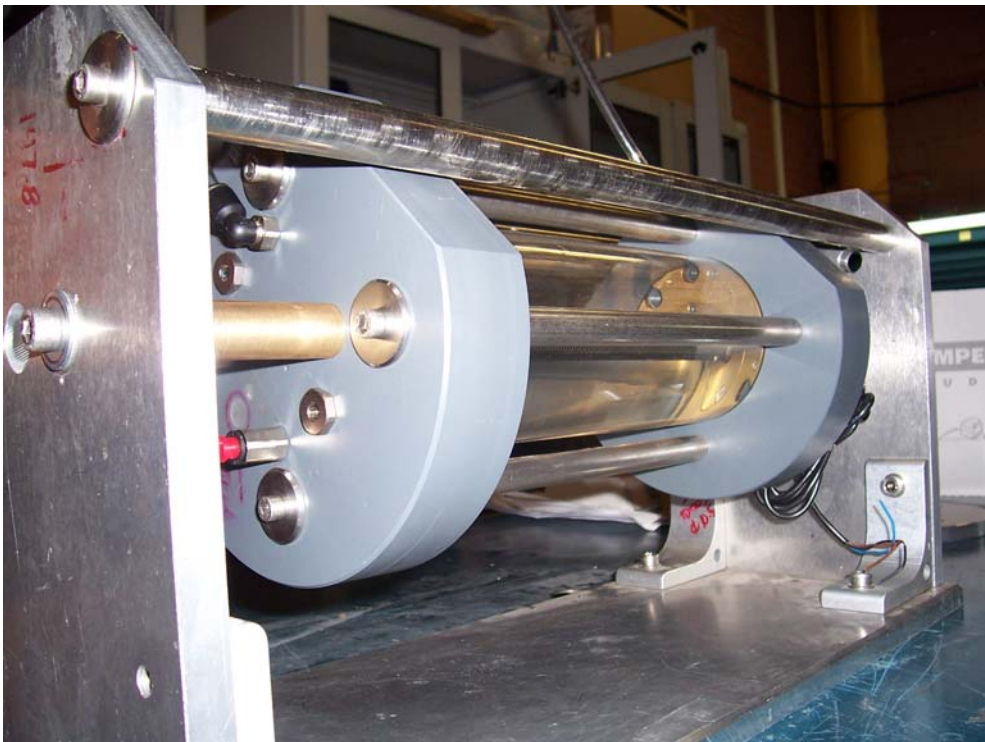
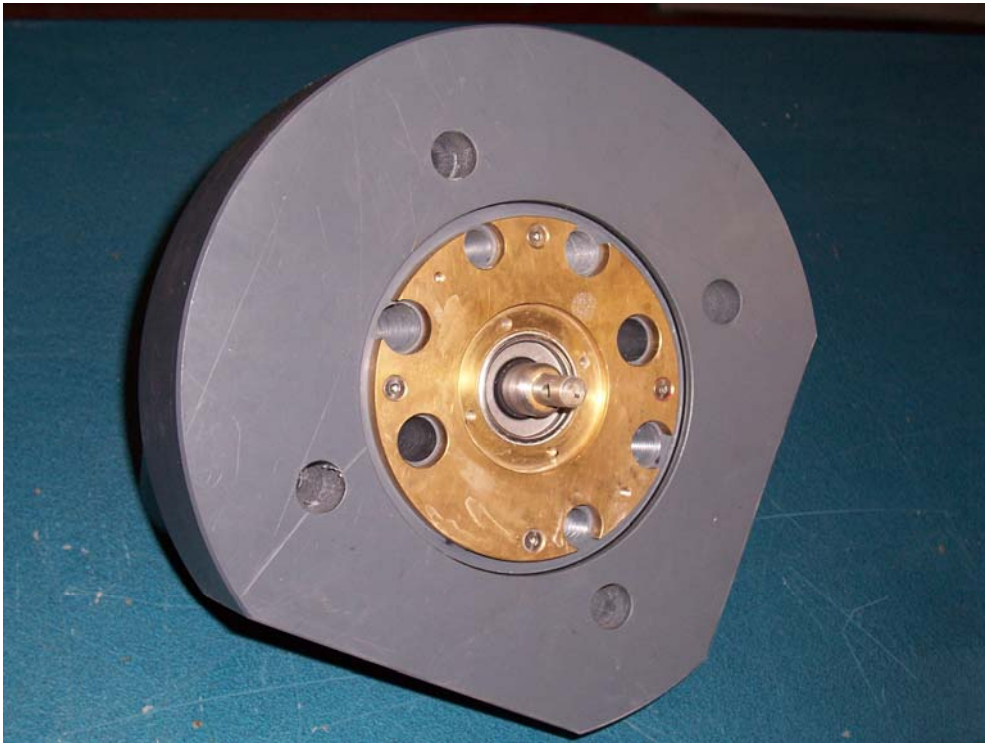
## **9. BIBLIOGRAFÍA**

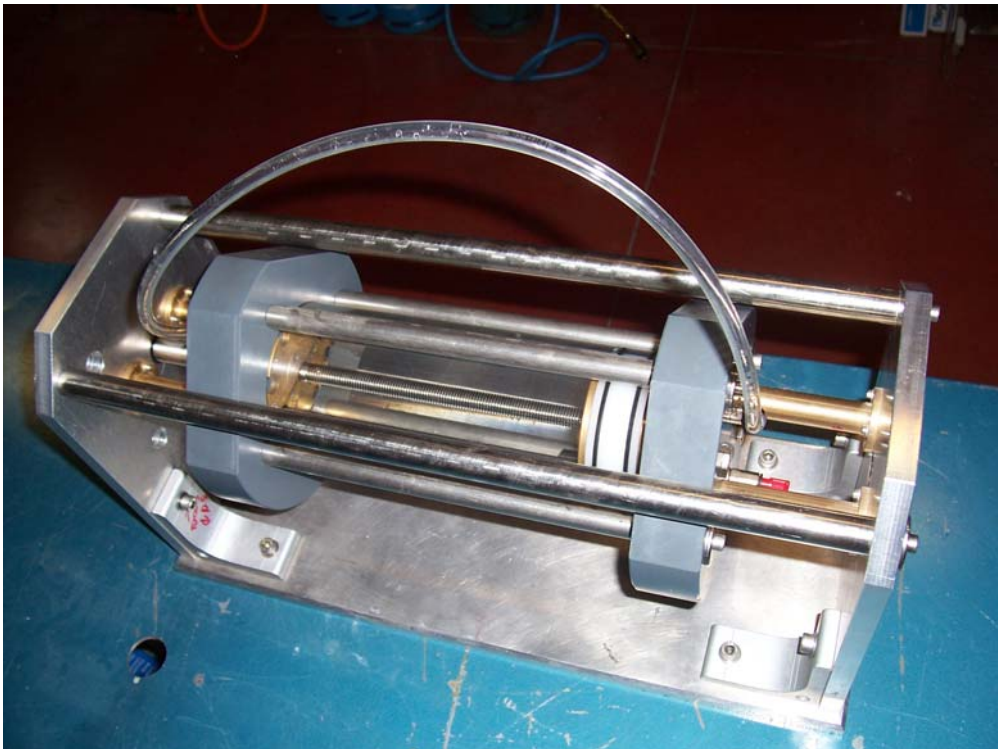
- **Biomechanics: circulation:** Fung, Y.C. Springe, 1984
- **Diseño de máquinas:** Diseño de elementos de máquinas - Mott, Robert L. Prentice Hall Hispanoamericana, 1995.
- **Mecánica de fluidos:** F.M. White. McGraw-Hill, 2004.
- **Fundamentos de Mecánica de Fluidos:** P. Gerhart, R.Gross, J. Hochstein. Addison-Wesley Iberoamericana, 1995.
- **Resistencia de Materiales:** Ortiz Berrocal, L. McGraw-Hill, 1998.
- **Applications and design with analog integrated circuits:** Jacob, J.M. Prentice-Hall, 1993.
- **Hidráulica proporcional:** D. Dcholz, A. Zimmermann. Fesco Didactic, 2000.
- **Mecánica de fluidos:** A. Crespo. Thomson Editores Spain, 2006.
- **Programación:** Castor F. Herrmann, María E. Valesani. MOGLIA S.R.L., 2001

## ***ANEXO PLANOS***

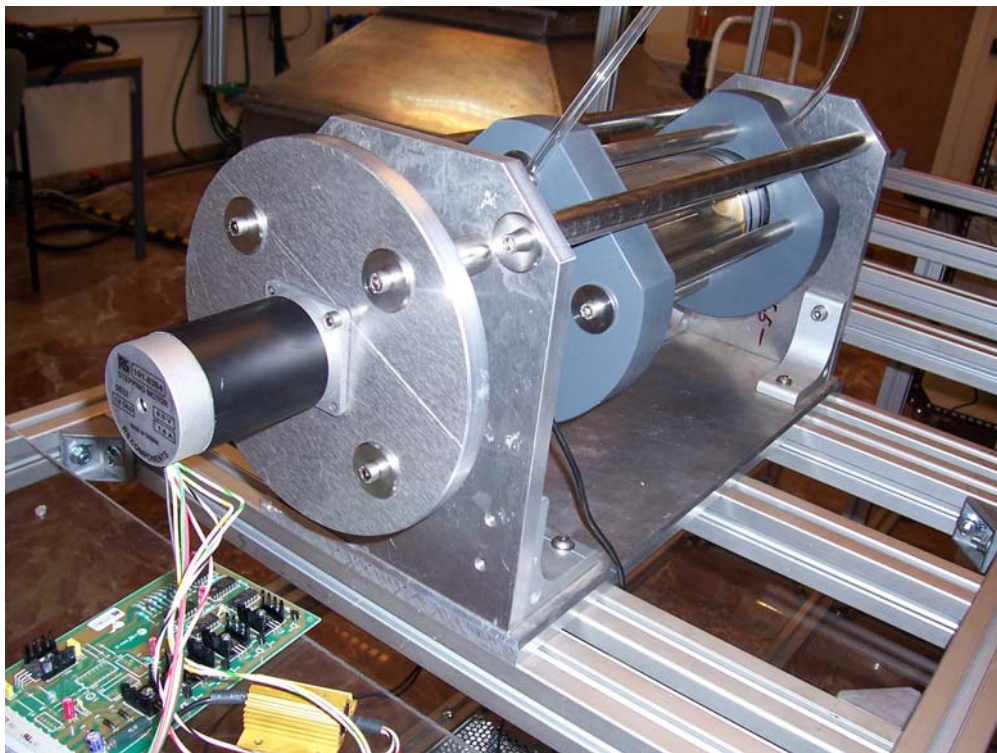
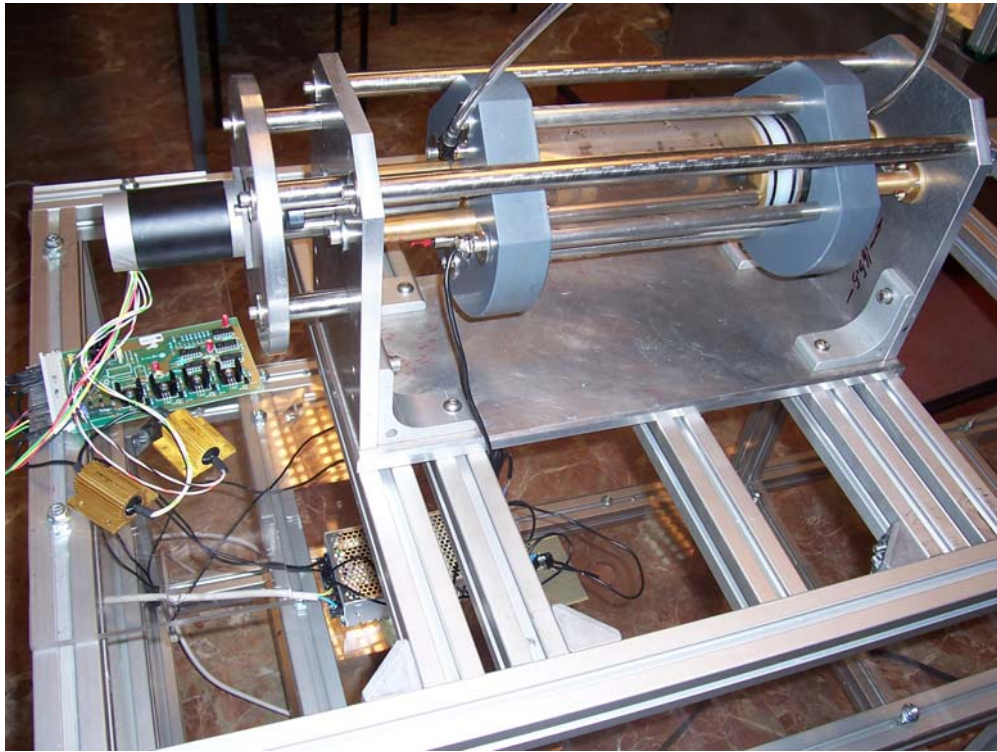
## ***ANEXO FOTOGRÁFICO***



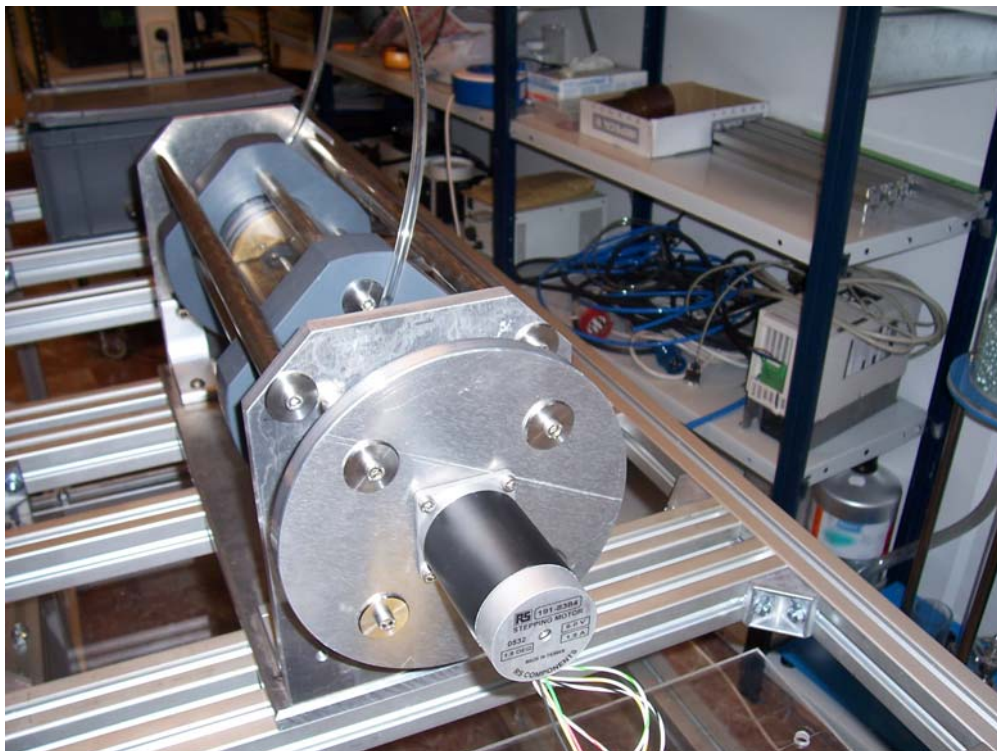
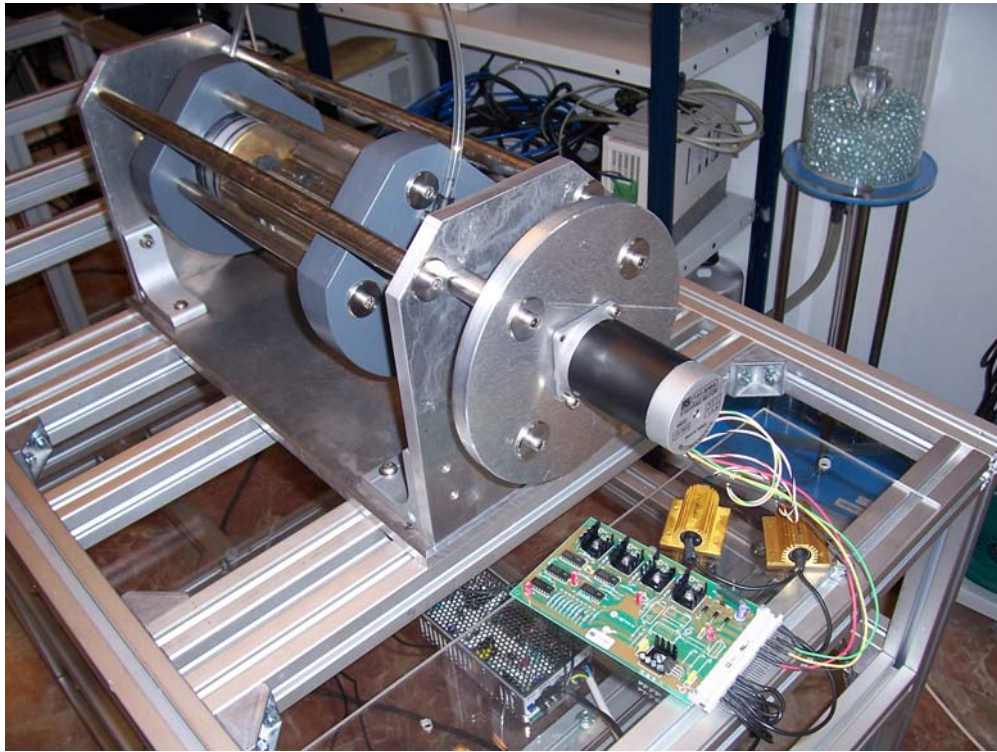












***ANEXO SOFTWARE***

New

```
Proc ciclo_izq{
prescale(100)
PARAM(0,5500,6500,55700)
MOVE(109)
PARAM(0,6500,5800,-40400)
MOVE(112)
PARAM(0,5700,5000,-40400)
MOVE(98)
PARAM(0,5050,5020,-1600)
MOVE(91)
PARAM(0,5000,6000,55600)
MOVE(100)
PARAM(0,6000,9500,192300)
MOVE(142)
PARAM(0,9500,23200,747200)
MOVE(298)
PARAM(0,23200,30800,416600)
MOVE(492)
PARAM(0,30800,29300,-80600)
MOVE(548)
PARAM(0,29300,25600,-205700)
MOVE(501)
PARAM(0,25600,21400,-226000)
MOVE(429)
PARAM(0,21400,18100,-182100)
MOVE(361)
PARAM(0,18100,13900,-232700)
MOVE(291)
PARAM(0,13900,9900-217600)
MOVE(216)
PARAM(0,9900,6600,-178700)
MOVE(150)
PARAM(0,6600,5000,-84300)
MOVE(106)
PARAM(0,5000,5500,23600)
MOVE(96)
PARAM(0,5500,6800,70800)
MOVE(112)
PARAM(0,9900,6600,-178700)
MOVE(118)
PARAM(0,6600,3600,-139900)
MOVE(89)
PARAM(0,3600,5850,123100)
MOVE(86)
PARAM(0,5850,9820,217500)
MOVE(143)
PARAM(0,9820,120400,121400)
MOVE(199)
```

```

PARAM(0,120400,12170,6700)
MOVE(221)
PARAM(0,12170,12100,-3370)
MOVE(221)
PARAM(0,12100,10690,-77600)
MOVE(208)
PARAM(0,10690,8900,-97800)
MOVE(178)
PARAM(0,8900,7640,-69200)
MOVE(151)
PARAM(0,7640,6500,-62400)
MOVE(129)
PARAM(0,6500,5510,-54000)
MOVE(109)
PARAM(0,5510,6070,30400)
MOVE(105)
PARAM(0,6070,5480,-320)
MOVE(105)
PARAM(0,5480,6130,35400)
MOVE(106)
PARAM(0,6130,5480,-35400)
MOVE(106)
PARAM(0,5480,6160,37100)
MOVE(106)
PARAM(0,6160,6040,-6700)
MOVE(111)
PARAM(-0,6040,6620,32000)
MOVE(115)
PARAM(0,6620,6530,-5100)
MOVE(120)
PARAM(0,6530,6590,3400)
MOVE(119)
PARAM(0,6590,7150,30400)
MOVE(125)
PARAM(0,7150,6590,-30400)
MOVE(125)
PARAM(0,6590,5540,-57300)
MOVE(110)
}

```

```

Proc ciclo_der{
prescale(100)
PARAM(0,5500,6500,55700)
MOVE(-109)
PARAM(0,6500,5800,-40400)
MOVE(-112)
PARAM(0,5700,5000,-40400)
MOVE(-98)
PARAM(0,5050,5020,-1600)
MOVE(-91)
}

```

PARAM(0,5000,6000,55600)  
MOVE(-100)  
PARAM(0,6000,9500,192300)  
MOVE(-142)  
PARAM(0,9500,23200,747200)  
MOVE(-298)  
PARAM(0,23200,30800,416600)  
MOVE(-492)  
PARAM(0,30800,29300,-80600)  
MOVE(-548)  
PARAM(0,29300,25600,-205700)  
MOVE(-501)  
PARAM(0,25600,21400,-226000)  
MOVE(-429)  
PARAM(0,21400,18100,-182100)  
MOVE(-361)  
PARAM(0,18100,13900,-232700)  
MOVE(-291)  
PARAM(0,13900,9900,-217600)  
MOVE(-216)  
PARAM(0,9900,6600,-178700)  
MOVE(-150)  
PARAM(0,6600,5000,-84300)  
MOVE(-106)  
PARAM(0,5000,5500,23600)  
MOVE(-96)  
PARAM(0,5500,6800,70800)  
MOVE(-112)  
PARAM(0,9900,6600,-178700)  
MOVE(-118)  
PARAM(0,6600,3600,-139900)  
MOVE(-89)  
PARAM(0,3600,5850,123100)  
MOVE(-86)  
PARAM(0,5850,9820,217500)  
MOVE(-143)  
PARAM(0,9820,120400,121400)  
MOVE(-199)  
PARAM(0,120400,12170,6700)  
MOVE(-221)  
PARAM(0,12170,12100,-3370)  
MOVE(-221)  
PARAM(0,12100,10690,-77600)  
MOVE(-208)  
PARAM(0,10690,8900,-97800)  
MOVE(-178)  
PARAM(0,8900,7640,-69200)  
MOVE(-151)  
PARAM(0,7640,6500,-62400)  
MOVE(-129)



```

PARAM(0,6500,5510,-54000)
MOVE(-109)
PARAM(0,5510,6070,30400)
MOVE(-105)
PARAM(0,6070,5480,-320)
MOVE(-105)
PARAM(0,5480,6130,35400)
MOVE(-106)
PARAM(0,6130,5480,-35400)
MOVE(-106)
PARAM(0,5480,6160,37100)
MOVE(-106)
PARAM(0,6160,6040,-6700)
MOVE(-111)
PARAM(-0,6040,6620,32000)
MOVE(-115)
PARAM(0,6620,6530,-5100)
MOVE(-120)
PARAM(0,6530,6590,3400)
MOVE(-119)
PARAM(0,6590,7150,30400)
MOVE(-125)
PARAM(0,7150,6590,-30400)
MOVE(-125)
PARAM(0,6590,5540,-57300)
MOVE(-110)
}

```

```

Proc Programa{

```

```

n=1
cont1=0
cont2=0
cont3=0

```

```

while (in(1,0)){
out(1,0)
prescale(100)
cvel (10000)
}

```

```

while((cont3LT400)OR(in(2,0)){
out(1,1)
ciclo_der
cont3++
}

```

```

If n=1 {
while((cont1LT350)OR(in(1,0)){
out(1,0)

```

```
ciclo_izq  
cont1++  
}  
n=0  
}
```

```
If n=0 {  
while((cont2LT350)OR(in(2,0))){  
out(1,1)  
ciclo_der  
cont2++  
}  
n=1  
}  
}
```